



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**EPS**

Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Málaga

# TRABAJO FIN DE GRADO

## MEMORIA

***“Caracterización y fabricación de sensores de cemento con nanotubos de carbono (CNTs)”***

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: JOSÉ LUIS GÓMEZ RODA

Tutor: GERMÁN CASTILLO LÓPEZ

Cotutor: FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ

junio de 2.017



## ÍNDICE MEMORIA

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>ESTADO ACTUAL DEL ARTE.....</b>	<b>11</b>
2.1	ADICIÓN DE CNTs PARA LA MEJORA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y EN LA ABSORCIÓN DE AGUA	11
2.2	ADICIÓN DE CNTs PARA SHM.....	13
<b>3</b>	<b>NANOTUBOS DE CARBONO.....</b>	<b>23</b>
3.1	DEFINICIÓN Y TIPOS .....	23
3.2	PROPIEDADES DE LOS NANOTUBOS.....	23
3.3	RESEÑA HISTÓRICA.....	24
3.4	FABRICACIÓN DE NANOTUBOS .....	25
3.4.1	Descarga de arco voltaico .....	25
3.4.2	Deposición química de vapor (CVD) .....	25
3.4.3	Ablación láser .....	26
<b>4</b>	<b>PRINCIPIO FÍSICO DE LA MEDIDA CON SENSORES DE CEMENTO CON CNTS ...</b>	<b>27</b>
4.1	SISTEMAS DE CONEXIÓN DE ELECTRODOS.....	28
<b>5</b>	<b>FABRICACIÓN DE SENSORES DE CEMENTO CON CNTS .....</b>	<b>33</b>
5.1	DISEÑO DEL SENSOR.....	33
5.1.1	Elección del molde.....	33
5.1.2	Fabricación de los moldes.....	38
5.2	DISPERSIÓN DE LOS NANOTUBOS MEDIANTE SONICACIÓN.....	42
5.2.1	Técnica de sonicación .....	42
5.2.2	Ensayos realizados.....	45
5.2.3	Conclusiones .....	51
5.3	AMASADO.....	51
5.3.1	Materiales empleados.....	51
5.3.2	Proceso de amasado.....	53
5.4	PROCESO DE COLADA .....	59
5.5	DESMOLDEO.....	61
5.6	MEJORAS EN LAS FUTURAS AMASADAS.....	63
<b>6</b>	<b>CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE LOS SENSORES .....</b>	<b>71</b>
6.1	ENSAYO ESTÁTICO SIN CARGA .....	71
6.1.1	Metodología .....	72
6.1.2	Cadena de medida .....	73
6.1.3	Resultados.....	75
6.1.4	Análisis de resultados y conclusiones.....	76
6.1.5	Detección de discontinuidades.....	77
6.2	ENSAYO ESTÁTICO CON CARGA .....	81
6.2.1	Metodología .....	81
6.2.2	Cadena de medida .....	83
6.2.3	Resultados, análisis y fenomenología.....	84
6.2.4	Conclusiones .....	97
<b>7</b>	<b>MEDIDA EXPERIMENTAL EN CASOS REALES.....</b>	<b>99</b>
7.1	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO.....	99
7.1.1	Conceptos teóricos.....	100
7.2	EL RUIDO ELÉCTRICO .....	105

**Memoria**

7.2.1	Sistemas de alimentación eléctrica y sus implicaciones .....	107
7.2.2	Caracterización y eliminación del ruido eléctrico durante la medición .....	111
7.2.3	Conclusiones sobre la eliminación del ruido eléctrico .....	118
7.3	CORRELACIÓN TEÓRICO-EXPERIMENTAL .....	118
7.4	CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES SEGÚN TIPO DE CONEXIÓN .....	119
<b>8</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>123</b>
<b>9</b>	<b>LÍNEAS FUTURAS</b> .....	<b>125</b>
<b>10</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>127</b>



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 2-1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa) PARA LA SERIE DE REFERENCIA Y LAS DOS FORMAS DE ADICIÓN DE CNT (MARCONDES, MEDEIROS, MARQUES FILHO, & HELENE, 2015) ..	12
ILUSTRACIÓN 2-2 CONEXIÓN ENTRE EL CEMENTO HIDRATADO Y LOS NANOMATERIALES (MARCONDES, MEDEIROS, MARQUES FILHO, & HELENE, 2015) .....	13
ILUSTRACIÓN 2-3 EJEMPLOS PARA LA PUNTUACIÓN DE LOS DIFERENTES FACTORES DE DISPERSIÓN (D´ALESSANDRO, RALLINI, UBERTINI, MATERAZZI, & KENNY, 2015) .....	14
ILUSTRACIÓN 2-4 RESULTADOS DEL ENSAYO DE DISPERSIÓN (D´ALESSANDRO, RALLINI, UBERTINI, MATERAZZI, & KENNY, 2015) .....	15
ILUSTRACIÓN 2-5 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DISPERSIÓN PARA LAS TRES MUESTRAS SELECCIONADAS (D´ALESSANDRO, RALLINI, UBERTINI, MATERAZZI, & KENNY, 2015).....	16
ILUSTRACIÓN 2-6 EVOLUCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA CON EL TIEMPO PARA EL ENSAYO DC (D´ALESSANDRO, RALLINI, UBERTINI, MATERAZZI, & KENNY, 2015) .....	18
ILUSTRACIÓN 2-7 VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA CON EL CONTENIDO DE MWCNTs SEGÚN EL ENSAYO AC (D´ALESSANDRO, RALLINI, UBERTINI, MATERAZZI, & KENNY, 2015) .....	19
ILUSTRACIÓN 2-8 HISTORIAL DE DEFORMACIÓN ESTIMADA Y MEDIDA PARA LAS MUESTRAS DE PASTA DE CEMENTO, MORTERO Y HORMIGÓN. (D´ALESSANDRO, RALLINI, UBERTINI, MATERAZZI, & KENNY, 2015).....	20
ILUSTRACIÓN 3-1 MWCNT (WIESER, E.).....	23
ILUSTRACIÓN 3-2 SAMIO LIJIMA (WWW.EPO.ORG) .....	24
ILUSTRACIÓN 3-3 REACTOR CVD PARA CRECIMIENTO DE NANOTUBOS INDUCIDOS POR PLASMA (WIKIPEDIA) .....	26
ILUSTRACIÓN 4-1 SENSOR SOMETIDO A UN CICLO DE COMPRESIÓN (UBERTINI & D´ALESSANDRO, 2016) .....	28
ILUSTRACIÓN 4-2 CONEXIÓN MEDIANTE PINZAS TIPO COCODRILO .....	29
ILUSTRACIÓN 4-3 CONEXIÓN MEDIANTE FICHA DE EMPALME .....	30
ILUSTRACIÓN 4-4 CONEXIÓN TIPO 1 .....	30
ILUSTRACIÓN 4-5 CONEXIÓN TIPO 2 .....	31
ILUSTRACIÓN 4-6 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA PARA LA CONEXIÓN TIPO 1 .....	31
ILUSTRACIÓN 4-7 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA PARA LA CONEXIÓN TIPO 2 .....	32
ILUSTRACIÓN 5-1 SENSOR CON LOS ELECTRODOS INTRODUCIDOS.....	33
ILUSTRACIÓN 5-2 MOLDE USADO POR PERUGIA (D´ALESSANDRO, A.) .....	34
ILUSTRACIÓN 5-3 COLOCACIÓN DE LOS ELECTRODOS EN EL POLIESTIRENO EXPANDIDO (D´ALESSANDRO, A.) .....	34
ILUSTRACIÓN 5-4 INTRODUCCIÓN DE LOS ELECTRODOS EN EL MOLDE (D´ALESSANDRO, A.) .....	35
ILUSTRACIÓN 5-5 MOLDE U (1).....	35
ILUSTRACIÓN 5-6 MOLDE U (2).....	36
ILUSTRACIÓN 5-7 MOLDE U (3).....	36
ILUSTRACIÓN 5-8 MOLDES USADOS .....	37
ILUSTRACIÓN 5-9 DETALLE DE LOS MOLDES USADOS .....	37
ILUSTRACIÓN 5-10 LISTONES SEPARADORES DE ELECTRODOS .....	38
ILUSTRACIÓN 5-11 CORTE DE SEPARADORES.....	39
ILUSTRACIÓN 5-12 COLOCACIÓN DE PERFILES L50 SEPARADOS 50 MM .....	39
ILUSTRACIÓN 5-13 DETALLE SELLADO CON MASILLA DE CARROCERO .....	40
ILUSTRACIÓN 5-14 MONTAJE DE LOS SEPARADORES .....	40
ILUSTRACIÓN 5-15 MONTAJE SEPARADORES DE LOS ELECTRODOS.....	41
ILUSTRACIÓN 5-16 UNIÓN DE LOS LISTONES SEPARADORES.....	41
ILUSTRACIÓN 5-17 COLOCACIÓN DE RECTÁNGULOS GUÍA.....	42
ILUSTRACIÓN 5-18 GUÍA PARA IMPEDIR LA FLEXIÓN DE LOS LISTONES.....	42
ILUSTRACIÓN 5-19 CAVITACIÓN EN EL PROCESO DE SONICACIÓN (HIELSCHER ULTRASONICS GMBH, 2017).....	43

**Memoria**

ILUSTRACIÓN 5-20 ELEMENTOS DE UN SONICADOR HIELSCHER UIP 1000 hDT.....	44
ILUSTRACIÓN 5-21 SONOTRODO.....	44
ILUSTRACIÓN 5-22 SALA DE SONICACIÓN INSTALADA EN CÁMARA FRIGORÍFICA.....	45
ILUSTRACIÓN 5-23 DISOLUCIÓN 1% CNTs .....	46
ILUSTRACIÓN 5-24 MUESTRAS DEL ENSAYO DE DISPERSIÓN.....	48
ILUSTRACIÓN 5-25 REFRIGERACIÓN CON HIELO DURANTE LA SONICACIÓN .....	49
ILUSTRACIÓN 5-26 EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA.....	50
ILUSTRACIÓN 5-27 EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA.....	50
ILUSTRACIÓN 5-28 SACO DE CEMENTO CEM I 42.5 R/SR .....	52
ILUSTRACIÓN 5-29 SUPERPLASTIFICANTE BASF MASTEREASE 3850 .....	52
ILUSTRACIÓN 5-30 PELLETS .....	53
ILUSTRACIÓN 5-31 MATERIALES PREPARADOS PARA LA SONICACIÓN .....	54
ILUSTRACIÓN 5-32 SONICACIÓN MÁS AGITADOR MAGNÉTICO .....	55
ILUSTRACIÓN 5-33 COLOCACIÓN DEL SONOTRODO .....	55
ILUSTRACIÓN 5-34 EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DURANTE LA SONICACIÓN PARA LAS TRES AMASADAS .....	56
ILUSTRACIÓN 5-35 EVOLUCIÓN DE LA POTENCIA TRANSFERIDA DURANTE LA SONICACIÓN PARA LAS TRES AMASADAS .....	56
ILUSTRACIÓN 5-36 ADICIÓN DE LA DISOLUCIÓN DE LA AMASADA Nº 2 AL CEMENTO .....	57
ILUSTRACIÓN 5-37 AMASADORA AUTOMÁTICA .....	58
ILUSTRACIÓN 5-38 AMASADA DURANTE EL MEZCLADO .....	58
ILUSTRACIÓN 5-39 MEZCLA LISTA PARA LLENAR LOS MOLDES.....	59
ILUSTRACIÓN 5-40 MOLDES DURANTE EL PROCESO DE COLADA .....	59
ILUSTRACIÓN 5-41 MESA VIBRANTE .....	60
ILUSTRACIÓN 5-42 DETALLE DE LOS ELECTRODOS INTRODUCIDOS .....	60
ILUSTRACIÓN 5-43 FRAGUADO Y ENDURECIMIENTO DE LOS SENSORES .....	61
ILUSTRACIÓN 5-44 SENSOR 4.4.....	61
ILUSTRACIÓN 5-45 SENSOR 2.11.....	62
ILUSTRACIÓN 5-46 SENSOR 3.5.....	62
ILUSTRACIÓN 5-47 CAPA BLANQUECINA EN EL SENSOR 4.5 .....	63
ILUSTRACIÓN 5-48 IDENTIFICADOR DEL SENSOR 4.7 .....	63
ILUSTRACIÓN 5-49 MOLDE METÁLICO (VISTA 1) .....	64
ILUSTRACIÓN 5-50 MOLDE METÁLICO (VISTA 2).....	64
ILUSTRACIÓN 5-51 MOLDE METÁLICO (VISTA 3) .....	65
ILUSTRACIÓN 5-52 AMASADAS EN MOLDES METÁLICOS .....	66
ILUSTRACIÓN 5-53 DESMOLDADO AMASADA Nº 7 SIN ABRIR EL MOLDE.....	67
ILUSTRACIÓN 5-54 SENSOR 7.1.....	67
ILUSTRACIÓN 5-55 SENSOR 7.1 AÚN SIN IDENTIFICAR .....	67
ILUSTRACIÓN 5-56 SENSOR AMASADA Nº 9 CON GRIETA SUPERFICIAL .....	68
ILUSTRACIÓN 5-57 SENSOR 9.1.....	68
ILUSTRACIÓN 5-58 SENSOR 8.2.....	69
ILUSTRACIÓN 5-59 RETRACCIÓN EN LA ZONA DE LOS ELECTRODOS EN EL SENSOR 8.3 .....	69
ILUSTRACIÓN 6-1 EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA DEL SENSOR 2.11 .....	71
ILUSTRACIÓN 6-2 CADENA DE MEDIDA.....	74
ILUSTRACIÓN 6-3 CONEXIONES UNIDAD DE MEDIDA .....	75
ILUSTRACIÓN 6-4 EVOLUCIÓN RESISTENCIA .....	76
ILUSTRACIÓN 6-5 GRIETA EN EL SENSOR 4.3.....	76
ILUSTRACIÓN 6-6 NUMERACIÓN DE ELECTRODOS EN EL SENSOR 4.3 .....	78
ILUSTRACIÓN 6-7 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA CON LA DISTANCIA PARA EL SENSOR 4.3.....	78
ILUSTRACIÓN 6-8 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA CON LA DISTANCIA PARA EL SENSOR 4.7.....	79
ILUSTRACIÓN 6-9 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA CON LA DISTANCIA PARA LA AMASADA Nº 2.....	80
ILUSTRACIÓN 6-10 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA CON LA DISTANCIA PARA LA AMASADA Nº 3.....	80

**Memoria**

ILUSTRACIÓN 6-11 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA CON LA DISTANCIA PARA LA AMASADA Nº 4 .....	81
ILUSTRACIÓN 6-12 SENSOR DEBIDAMENTE COLOCADO EN LA MÁQUINA DE TRACCIÓN .....	82
ILUSTRACIÓN 6-13 CADENA DE MEDIDA PARA EL ENSAYO ESTÁTICO CON CARGA .....	84
ILUSTRACIÓN 6-14 CARGA APLICADA AL SENSOR 3.3 EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	85
ILUSTRACIÓN 6-15 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL SENSOR 3.3 EN FUNCIÓN DEL TIEMPO .....	85
ILUSTRACIÓN 6-16 VARIACIÓN DEL INCREMENTO UNITARIO DE RESISTENCIA DEL SENSOR 3.3 EN FUNCIÓN DEL TIEMPO .....	86
ILUSTRACIÓN 6-17 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA UNITARIA PARA LA PRIMERA SUBIDA DEL SENSOR 3.3 .....	87
ILUSTRACIÓN 6-18 SENSIBILIDAD DE LA AMASADA Nº 3.....	89
ILUSTRACIÓN 6-19 INCREMENTO UNITARIO DE RESISTENCIA PARA LA AMASADA Nº 2 .....	89
ILUSTRACIÓN 6-20 SENSIBILIDAD DE LA AMASADA Nº 2.....	90
ILUSTRACIÓN 6-21 INCREMENTO UNITARIO DE RESISTENCIA PARA LA AMASADA Nº 3 .....	90
ILUSTRACIÓN 6-22 SENSIBILIDAD DE LA AMASADA Nº 4.....	91
ILUSTRACIÓN 6-23 INCREMENTO UNITARIO DE RESISTENCIA PARA LA AMASADA Nº 4 .....	91
ILUSTRACIÓN 6-24 SENSIBILIDAD SEGÚN % DE CNTs.....	92
ILUSTRACIÓN 6-25 LINEALIDAD EN LA VARIACIÓN DE LA SENSIBILIDAD SEGÚN % CNTs.....	93
ILUSTRACIÓN 6-26 INCREMENTO UNITARIO DE RESISTENCIA EN FUNCIÓN DE LA CARGA PARA EL SENSOR 2.3 EN LA 2ª SUBIDA .....	94
ILUSTRACIÓN 6-27 DEFECTO (1) SENSOR 2.3.....	94
ILUSTRACIÓN 6-28 DEFECTO (2) SENSOR 2.3.....	95
ILUSTRACIÓN 6-29 NUBE DE PUNTOS DEL INCREMENTO UNITARIO DE RESISTENCIA EN FUNCIÓN DE LA FUERZA PARA EL SENSOR 2.4 .....	95
ILUSTRACIÓN 6-30 SENSOR 2.4 (1) .....	96
ILUSTRACIÓN 6-31 SENSOR 2.4 (2) .....	96
ILUSTRACIÓN 6-32 INCREMENTO UNITARIO DE RESISTENCIA EN FUNCIÓN DE LA FUERZA PARA LA 1ª BAJADA DEL SENSOR 3.3 .....	97
ILUSTRACIÓN 6-33 SENSOR 3.3.....	97
ILUSTRACIÓN 7-1 VIGA BIAPOYADA A ENSAYAR.....	99
ILUSTRACIÓN 7-2 ELEMENTOS SOBRE EL PUNTO MEDIO LA VIGA .....	99
ILUSTRACIÓN 7-3 SISTEMA DE 1 GLD (OSUNA TORO, 2013) .....	100
ILUSTRACIÓN 7-4 VIGA APOYADA EN LOS EXTREMOS Y SOMETIDA A UNA CARGA PUNTUAL P EN EL CENTRO DE LA VIGA (MAGATO SUÁREZ, Y OTROS, 2010).....	101
ILUSTRACIÓN 7-5 ANÁLISIS ARMÓNICO (OSUNA TORO, 2013) .....	102
ILUSTRACIÓN 7-6 ANÁLISIS TEMPORAL (IZQUIERDA) Y FRECUENCIAL (DERECHA) (OSUNA TORO, 2013) .....	103
ILUSTRACIÓN 7-7 VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA EN EL MOMENTO DE UN GOLPE SOBRE LA VIGA .....	104
ILUSTRACIÓN 7-8 FFT A LA SEÑAL DE LA ILUSTRACIÓN 7-7 .....	104
ILUSTRACIÓN 7-9 SEÑAL CON POCO RUIDO .....	106
ILUSTRACIÓN 7-10 SEÑAL CON MUCHO RUIDO .....	106
ILUSTRACIÓN 7-11 GENERADOR ELÉCTRICO.....	107
ILUSTRACIÓN 7-12 CURVA DE RESISTENCIA CON RED ELÉCTRICA Y CONEXIÓN TIPO 2 .....	108
ILUSTRACIÓN 7-13 ZOOM DE LA CURVA DE LA ILUSTRACIÓN 7-12 .....	108
ILUSTRACIÓN 7-14 FFT DE LA CURVA DE LA ILUSTRACIÓN 7-12.....	109
ILUSTRACIÓN 7-15 CURVA DE RESISTENCIA CON EL GENERADOR Y CONEXIÓN TIPO 2.....	110
ILUSTRACIÓN 7-16 ZOOM DE LA CURVA DE LA ILUSTRACIÓN 7-15 .....	110
ILUSTRACIÓN 7-17 FFT DE LA CURVA DE ILUSTRACIÓN 7-15.....	111
ILUSTRACIÓN 7-18 CURVA DE RESISTENCIA USANDO EL GENERADOR Y EL FILTRO FÍSICO CON CONEXIÓN TIPO 2 .....	112
ILUSTRACIÓN 7-19 ZOOM DE LA CURVA DE LA ILUSTRACIÓN 7-18 .....	113
ILUSTRACIÓN 7-20 FFT DE LA CURVA DE LA ILUSTRACIÓN 7-18.....	113

**Memoria**

ILUSTRACIÓN 7-21 CURVA DE RESISTENCIA CON EL GENERADOR ELÉCTRICO Y EL FILTRO INFORMÁTICO, USANDO CONEXIÓN TIPO 2 .....	114
ILUSTRACIÓN 7-22 ZOOM DE LA CURVA DE LA ILUSTRACIÓN 7-21 .....	115
ILUSTRACIÓN 7-23 FFT DE LA CURVA DE LA ILUSTRACIÓN 7-21 .....	115
ILUSTRACIÓN 7-24 CURVA DE RESISTENCIA CON RED ELÉCTRICA Y CONEXIÓN TIPO 1 .....	116
ILUSTRACIÓN 7-25 ZOOM DE LA CURVA DE LA ILUSTRACIÓN 7-24 .....	117
ILUSTRACIÓN 7-26 FFT DE LA CURVA DE LA ILUSTRACIÓN 7-24.....	117
ILUSTRACIÓN 7-27 DETECCIÓN DE LOS GOLPES .....	119
ILUSTRACIÓN 7-28 BOLA DE ACERO .....	120
ILUSTRACIÓN 7-29 MONTAJE PARA DAR LOS GOLPES CON LA BOLA DE ACERO.....	120
ILUSTRACIÓN 7-30 CAMBIO BRUSCO EN LA RESISTENCIA.....	121

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 5-1 ENERGÍA TRANSMITIDA DURANTE LA SONICACIÓN .....	51
TABLA 5-2 DOSIFICACIÓN POR M <sup>3</sup> DE MEZCLA.....	53
TABLA 5-3 CANTIDADES USADAS EN LAS AMASADAS .....	54
TABLA 5-4 ENERGÍA TRANSFERIDA DURANTE LA SONICACIÓN .....	57
TABLA 5-5 DOSIFICACIÓN POR M <sup>3</sup> DE MEZCLA.....	65
TABLA 5-6 CANTIDADES USADAS EN LAS AMASADAS .....	66
TABLA 6-1 ERRORES DE LAS APROXIMACIONES A Y B .....	73
TABLA 6-2 EVOLUCIÓN DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA EN TIEMPO INFINITO DESDE LA AMASADA .....	75
TABLA 6-3 RESULTADOS DEL SENSOR 3.8.....	87
TABLA 6-4 RESULTADOS DEL SENSOR 3.5.....	87
TABLA 6-5 RESULTADOS DEL SENSOR 3.3.....	87
TABLA 6-6 RESULTADOS DEL SENSOR 2.3.....	88
TABLA 6-7 RESULTADOS DEL SENSOR 2.11.....	88
TABLA 6-8 RESULTADOS DEL SENSOR 4.3.....	88
TABLA 6-9 RESULTADOS DEL SENSOR 4.5.....	88
TABLA 6-10 RESULTADOS DEL SENSOR 4.4.....	88
TABLA 6-11 SENSIBILIDAD SEGÚN % DE CNTs.....	92

## ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 2-1 ÍNDICE DE DISPERSIÓN.....	14
ECUACIÓN 2-2 RESISTENCIA ELÉCTRICA (DC).....	16
ECUACIÓN 2-3 RESISTENCIA ELÉCTRICA (AC).....	17
ECUACIÓN 2-4 DEFORMACIÓN DE LOS SENSORES EN FUNCIÓN DEL TIEMPO .....	20
ECUACIÓN 4-1 ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA EXTENSOMETRÍA .....	27
ECUACIÓN 4-2 SENSIBILIDAD.....	27
ECUACIÓN 6-1 LEY DE OHM .....	72
ECUACIÓN 6-2 APROXIMACIÓN B .....	72
ECUACIÓN 6-3 INCREMENTO UNITARIO DE RESISTENCIA.....	83
ECUACIÓN 6-4 RELACIÓN ENTRE LA FUERZA Y LA RESISTENCIA .....	83
ECUACIÓN 7-1 FRECUENCIA PROPIA DE UN SISTEMA DE 1 GLD .....	101
ECUACIÓN 7-2 FRECUENCIA PROPIA DE UNA VIGA BIAPOYADA Y CON CARGA PUNTAL EN EL CENTRO DEL VANO EN RAD/S .....	101
ECUACIÓN 7-3 FRECUENCIA PROPIA DE UNA VIGA BIAPOYADA Y CON CARGA PUNTAL EN EL CENTRO DEL VANO EN HZ.....	101
ECUACIÓN 7-4 CÁLCULO DE LA FRECUENCIA PROPIA TEÓRICA DE LA VIGA DEL ENSAYO .....	102

## **1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

Hoy día, no cabe duda de la importancia de ciertas infraestructuras y construcciones, y de las terribles consecuencias que provocaría un fallo de las mismas. Tan solo hay que imaginar el colapso de un puente, o la rotura de una presa. Por lo tanto, la idea de monitorizar dichas estructuras resulta sumamente interesante, tanto desde el punto de vista económico como de la seguridad, ya que se podría actuar antes del fallo y evitar esas consecuencias, o reducirlas.

Pero no es tan fácil como parece, ya que la monitorización de estructuras o SHM, del inglés *Structural Health Monitoring*, presenta varios inconvenientes, como son la cantidad de sensores, implementar en las estructuras esos sensores o los costes de mantenimiento.

Los recientes avances en nanotecnología han propiciado el uso de nanotubos de carbono o CNTs (*Carbon Nanotubes*) para crear sensores a partir de pasta de cemento<sup>1</sup> aprovechando las propiedades eléctricas de estos nanotubos. Aún así, se plantea una serie de problemas que se describen a lo largo del presente TFG, intentando dar solución a una parte de ellos.

Los objetivos perseguidos se pueden resumir en los siguientes:

- Caracterización de los diferentes sensores obtenidos.
- Análisis de la dispersión y homogeneidad de los mismos.
- Establecer una dosificación y procedimiento de fabricación adecuado.
- Estudio de la sensibilidad.
- Proponer una serie de medidas de cara a una futura implantación industrial.

---

<sup>1</sup> También es posible obtener sensores de mortero u hormigón.

**Memoria**



## **2 ESTADO ACTUAL DEL ARTE**

Actualmente, en la adición de CNTs a pastas, morteros y hormigones se puede distinguir dos vertientes claramente diferenciadas según el objetivo que persiguen. La primera de ellas pretende una mejora de las propiedades mecánicas y en la absorción de agua. La segunda, que es la que ocupa este TFG, es la de elaborar una serie de sensores mediante la adición de CNTs que permitan monitorizar estructuras.

### **2.1 Adición de CNTs para la mejora de las propiedades mecánicas y en la absorción de agua**

A partir de diversas investigaciones<sup>2</sup> se ha llegado a plantear la hipótesis de que la adición de CNTs al cemento permite obtener hormigones más resistentes, menos porosos y con mayor durabilidad (Marcondes, 2012). Los principales problemas que han encontrado los investigadores en esta vertiente son la dispersión y homogeneización de los nanotubos, y su interacción en la hidratación del cemento.

Un estudio de la Universidad de Tailandia, realizado por profesor A. Chaipanich, consiguió un aumento en la resistencia del cemento del 10 %. En sus ensayos se estudió como influía la adición de CNTs dispersados en agua por ultrasonidos en un cemento con cenizas volantes. Con una adición del 1% de CNTs se logró que la resistencia a compresión a los 28 días pasara de 47.2 MPa a 51.8 MPa.

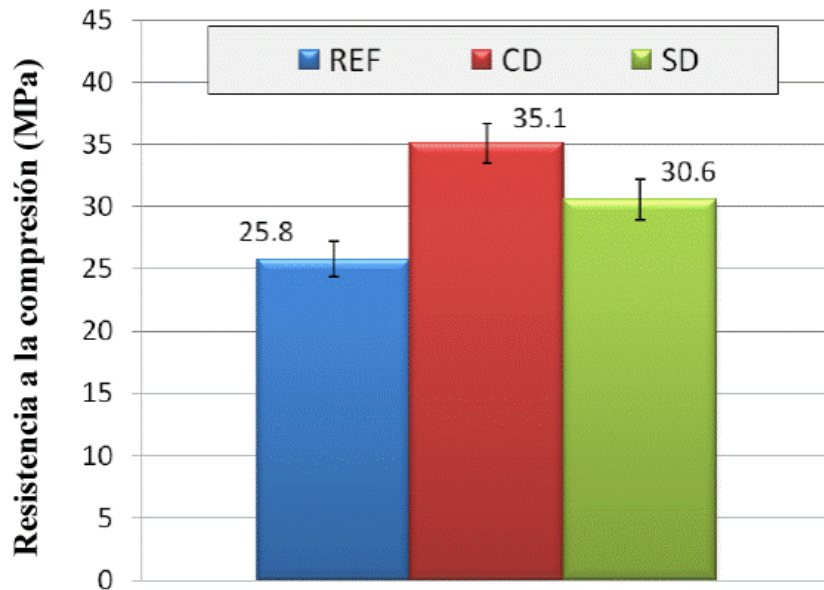
El Profesor C. G. N. Marcondes de la Universidad Pontificia Católica de Paraná llevó a cabo una serie de procedimientos experimentales estableciendo tres muestras distintas: una de referencia sin adición de CNTs (REF), otra en la que los CNTs se han dispersado previamente en agua y aditivo mediante ultrasonido (CD) y la última en la que el CNTs se ha mezclado en forma de polvo con el cemento sin aditivo ni ultrasonidos (SD). Las principales conclusiones a las que llegó Marcondes son:

- Con un 95% de confianza se puede afirmar que la resistencia a compresión y a tracción por compresión diametral están influidas por la dispersión de los nanotubos de carbono.
- La adición de CNTs mejora las resistencias a compresión y a tracción. Estas mejoras fueron de 37% y 19% para la mezcla CD, y de 19% y 17% para la mezcla SD, respectivamente.

---

<sup>2</sup> (Marcondes, Medeiros, Marques Filho, & Helene, 2015).

**Memoria**

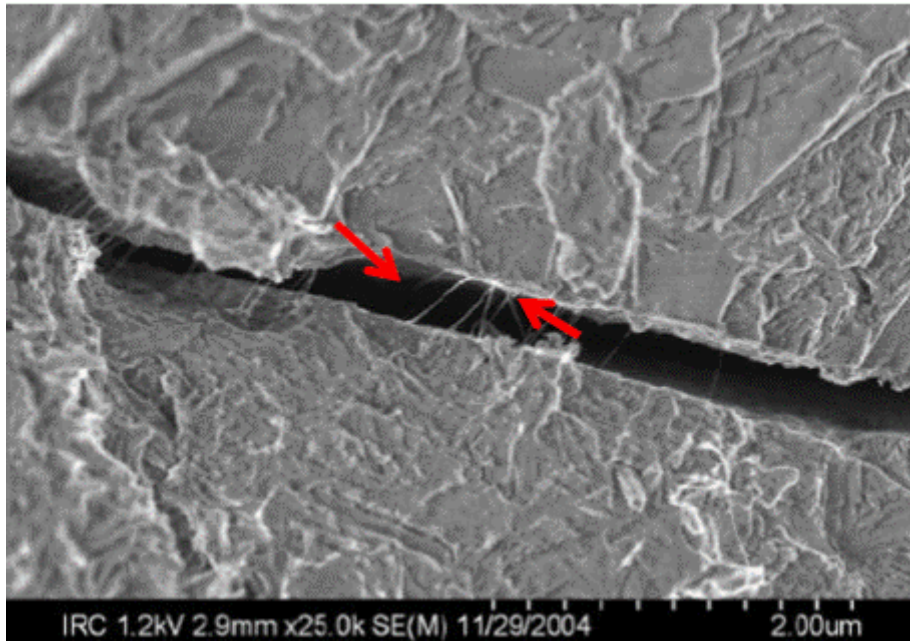


**Ilustración 2-1 Resistencia a la compresión (MPa) para la serie de referencia y las dos formas de adición de CNT (Marcondes, Medeiros, Marques Filho, & Helene, 2015)**

- La presencia de CNTs reduce la fluidez. En el caso de la dispersión previa por ultrasonido esta reducción relativamente pequeña, pero para la adición en forma de polvo era excesiva.
- La adición de CNTs reduce la absorción de agua.

Para los hechos anteriores se han planteado las siguientes explicaciones:

- Debido a la elevada superficie específica de los CNTs, y a las fuerzas de Van der Waals de atracción entre ellos, la fluidez y trabajabilidad de la mezcla se ve reducida.
- Los poros presentes se ven reducidos, ya que los CNTs, mucho más pequeños que esos poros, se acumulan en ellos y los cierran parcialmente, lo que impide que agentes perjudiciales los atraviesen y que menos agua pase a su interior. Como consecuencia, la durabilidad se ve incrementada.
- Además, los CNTs actúan como puentes de adherencia, es decir, se crea una conexión entre el cemento hidratado y los nanomateriales, lo que justifica el aumento de resistencia, tal y como se puede ver en la Ilustración 2-2.



**Ilustración 2-2 Conexión entre el cemento hidratado y los nanomateriales (Marcondes, Medeiros, Marques Filho, & Helene, 2015)**

Sin embargo, en un TFG realizado por Vicente Genovés Gómez, de la Universidad Politécnica de Valencia, en colaboración con AIDICO, llega a la conclusión después de una campaña de ensayos realizados a elementos prefabricados (losas alveolares y pilares) a tamaño real que la adición de nanotubos de carbono no aporta los resultados esperados, ya que no hay una mejora evidente las capacidades mecánicas de dicho hormigón, aunque otras propiedades, como la permeabilidad, si han experimentado una mejora notable.

## **2.2 Adición de CNTs para SHM<sup>3</sup>**

En este campo, las investigaciones más avanzadas son las encabezadas por Dra. Antonella D'Alessandro y Prof. Dr. Filippo Ubertini de la Universidad de Perugia. El presente TFG parte de dichas investigaciones, pues actualmente el desarrollo de los sensores se está llevando a cabo entre la Universidad de Perugia, la Universidad de Córdoba y la Universidad de Málaga, siendo Dr. Germán Castillo López y Dr. Felipe García Sánchez los investigadores de esta última.

En la Universidad de Perugia, Antonella D'Alessandro y su equipo, han realizado una serie de ensayos para determinar la cantidad óptima de CNTs, el mejor dispersante, procedimiento de elaboración y qué matriz emplear. Estos ensayos los podemos dividir en tres grupos:

---

<sup>3</sup> (D'Alessandro, Rallini, Ubertini, Materazzi, & Kenny, 2015)

### 1) Análisis de dispersión:

Se seleccionaron varios dispersantes, con varias concentraciones de los mismos respecto a la cantidad de CNTs añadida, y diferentes métodos de mezclado. En concreto, se trabajó con 9 dispersantes, concentraciones 0.1, 1 y 10 respecto a la cantidad de CNTs y mezclado por medios mecánicos (ME) y sonicación (SO).

Para determinar la calidad de la dispersión se ha establecido un índice J, con una puntuación máxima de 6 (dispersión óptima) y mínima de 0, el cual se define según la Ecuación 2-1:

$$J = S_1 + S_{28} + P$$

#### Ecuación 2-1 Índice de dispersión

Donde  $S_1$  es el factor inicial,  $S_{28}$  es factor final, y P es un factor que se obtiene de la observación mediante un microscopio SEM. Cada uno de estos factores puede adoptar los valores de 0 (deficiente), 1 (intermedio) y 2 (óptimo). Se evalúan de la siguiente forma:

- Para determinar  $S_1$  se diluye un 1 ml de MWCNTs en 10 ml de agua desionizada en un tubo de ensayo. Se da la vuelta al tubo y en función de la decantación de CNTs se le atribuye la puntuación. Se realiza una comprobación visual haciendo pasar una luz por el tubo.
- El factor  $S_{28}$  se obtiene igual que el anterior, salvo que la medición se realiza transcurridos 28 días.
- Para puntuar  $P$  se observa la muestra por un microscopio SEM y se puntúa según el siguiente criterio: 0 cuando la concentración de MWCNTs se observa con una amplificación de 100x, 1 si se observa con 500x, y 2 si es con 5000x.

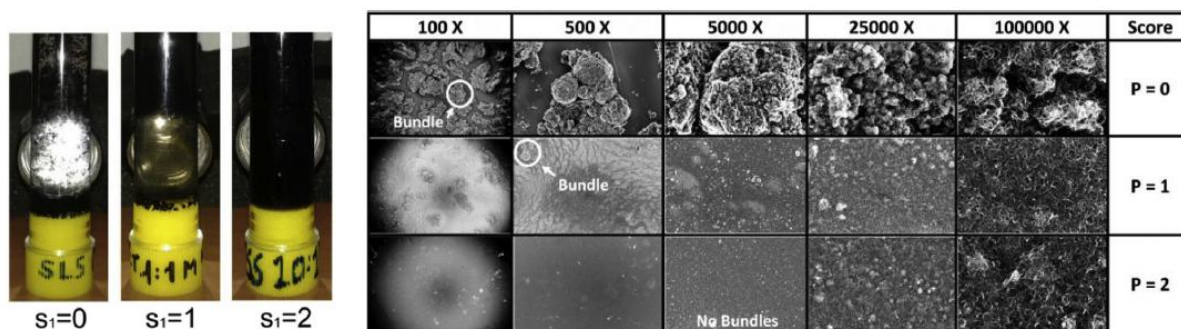


Ilustración 2-3 Ejemplos para la puntuación de los diferentes factores de dispersión (D'Alessandro, Rallini, Ubertini, Materazzi, & Kenny, 2015)

## Memoria

Teniendo en cuenta todas las variables para este ensayo ya enumeradas se obtuvieron 54 muestras diferentes. Para identificar estas muestras se ha empleado la siguiente nomenclatura: “MP\_DN\_DR”, donde MP es el tipo de mezclado (ME mecánico y SO sonicación), DN es el número identificador el dispersante y DR el ratio del mismo respecto a la cantidad de MWCNTs. Los resultados que obtenidos se muestran en la siguiente gráfica (Ilustración 2-4).

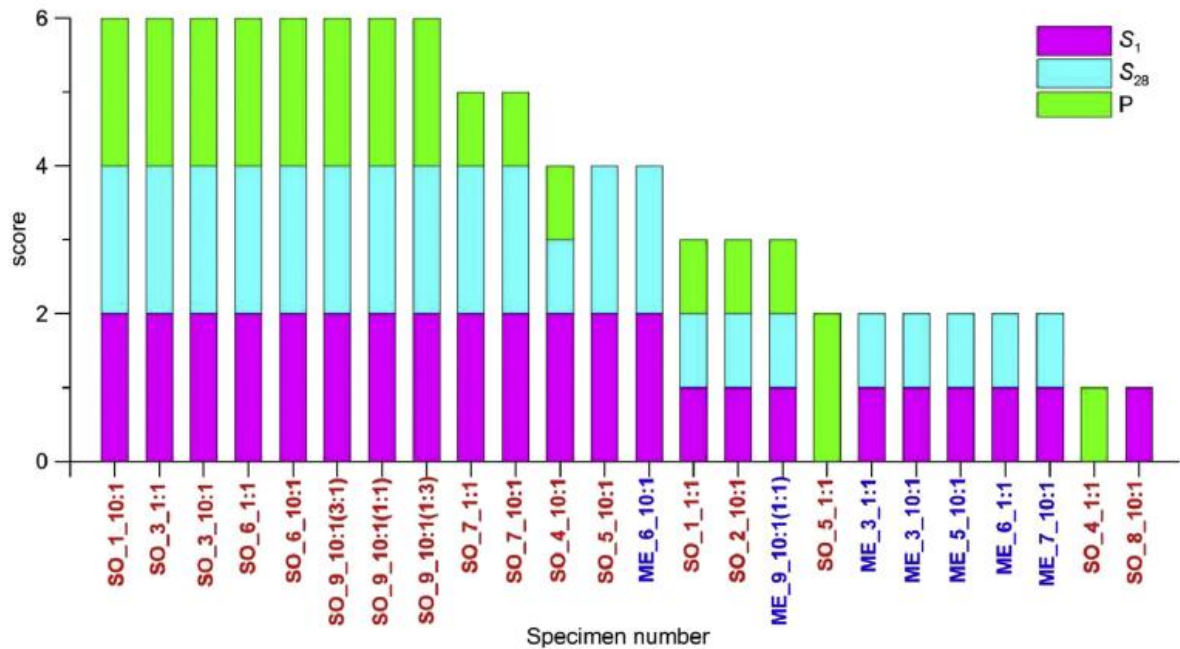


Ilustración 2-4 Resultados del ensayo de dispersión (D'Alessandro, Rallini, Ubertini, Materazzi, & Kenny, 2015)



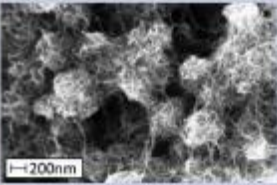


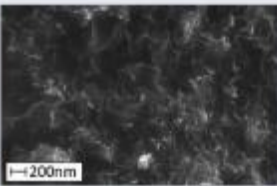


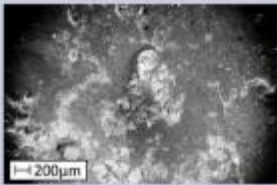
De acuerdo a la gráfica (Ilustración 2-4) se extraen las siguientes conclusiones:

- El método de mezclado por sonicación es el más efectivo.
- Las muestras con una concentración de dispersante 10:1 son más óptimas.
- El dispersante número 6 (SLS) es el más efectivo. Este dispersante consiste en una sal sódica de ácido lignosulfónico.

Atendiendo a las conclusiones se seleccionaron para el siguiente ensayo las muestras SO\_6\_1:1, SO\_6\_10:1 y ME\_6\_10:1. La importancia de la tercera muestra radica en su método de mezclado, que es más propicio de cara a una futura implantación industrial. Los resultados de las tres muestras seleccionadas se encuentran en la Ilustración 2-5.



**Memoria**

Sample identification	Initial settl. factor $S_1$	Final settl. factor $S_{28}$	SEM picture factor P	Final Score
SO_6_1:1	 $S_1 = 2$	 $S_{28} = 2$	 $P = 2$	6
SO_6_10:1	 $S_1 = 2$	 $S_{28} = 2$	 $P = 2$	6
ME_6_10:1	 $S_1 = 2$	 $S_{28} = 2$	 $P = 0$	4

**Ilustración 2-5** Resultados de los ensayos de dispersión para las tres muestras seleccionadas (D'Alessandro, Rallini, Ubertini, Materazzi, & Kenny, 2015)

## 2) Caracterización eléctrica

Existen dos tipos de ensayos distintos a realizar, uno con corriente continua (DC current) y otro con corriente alterna (AC current).

En el **ensayo DC** se aplica un diferencia de potencial de 1.5 V en los electrodos, y se mide la corriente  $I(t)$  que circula, para obtener así la resistencia. El problema del ensayo DC son los efectos de la polarización, lo que hace que la intensidad no sea constante. Este problema se solventa midiéndola al cabo un cierto tiempo cuando se estabiliza. La resistencia viene dada por la Ecuación 2-2, siendo  $A$  la sección del electrodo y  $d$  la distancia.

$$\rho_{DC} = \frac{V}{I(t_f)} \frac{A}{d}$$

**Ecuación 2-2** Resistencia eléctrica (DC)

### **Memoria**

En el **ensayo AC** no existe el problema de la polarización. Para ello se seleccionó una frecuencia de 25 kHz para reducir lo máximo posible su efecto, y se mide directamente la resistencia según Ecuación 2-3.

$$\rho_{AC} = R(\omega) \frac{A}{d}$$

#### **Ecuación 2-3 Resistencia eléctrica (AC)**

Estos ensayos se realizaron a partir de las tres muestras seleccionadas en el ensayo anterior. Para cada una de estas muestras se preparó una matriz de pasta de cemento (PA), mortero (MO) y hormigón (CO).

En el ensayo DC se aprecia como la conductividad decrece con el tiempo cuanto menor es la concentración de MWCNTs. Este efecto se asocia con la pérdida de agua debido al secado y absorción por la hidratación del cemento, y consecuentemente una pérdida de conducción iónica.

También, se aprecia como la conductividad aumenta, en líneas generales, con la cantidad de CNTs. De hecho, la conductividad aumentó en dos órdenes de magnitud con respecto al material sin adiciones. Estos resultados se pueden apreciar en la Ilustración 2-6.

## Memoria

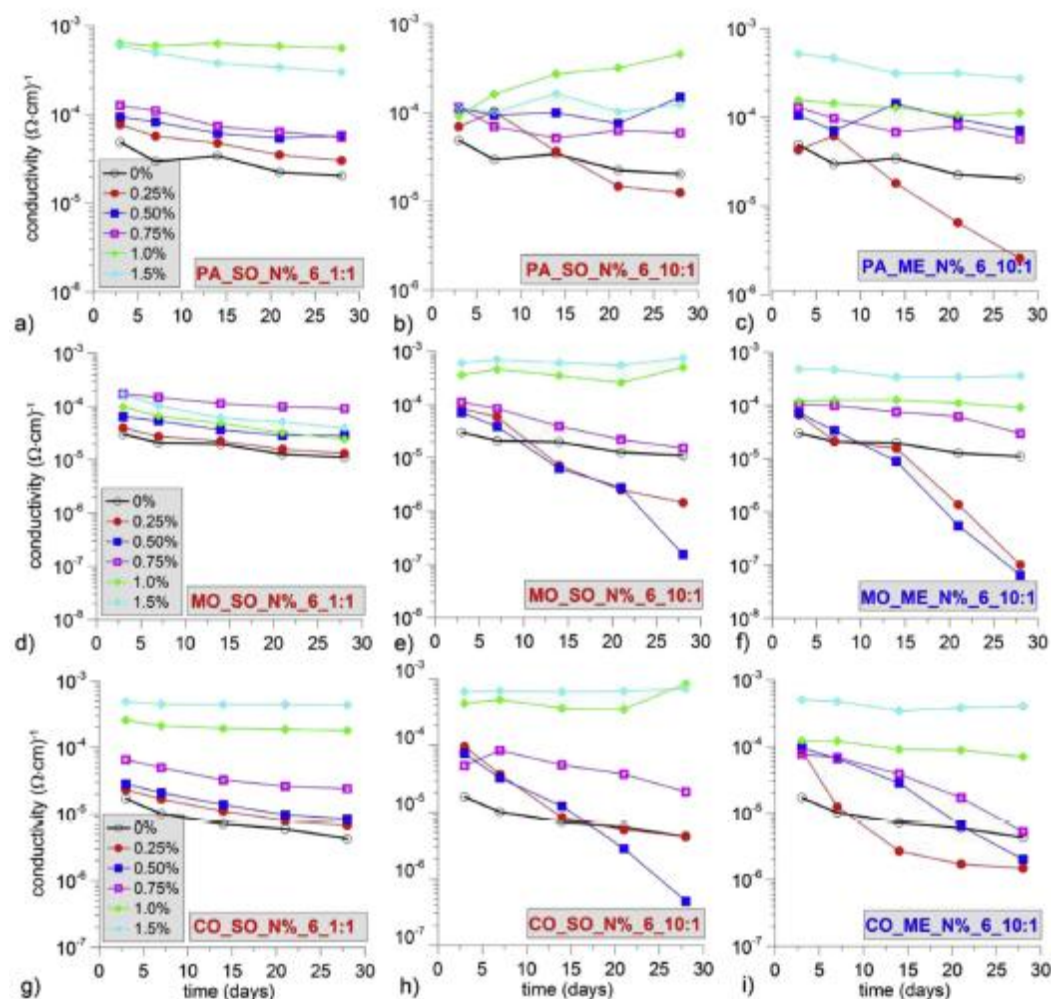


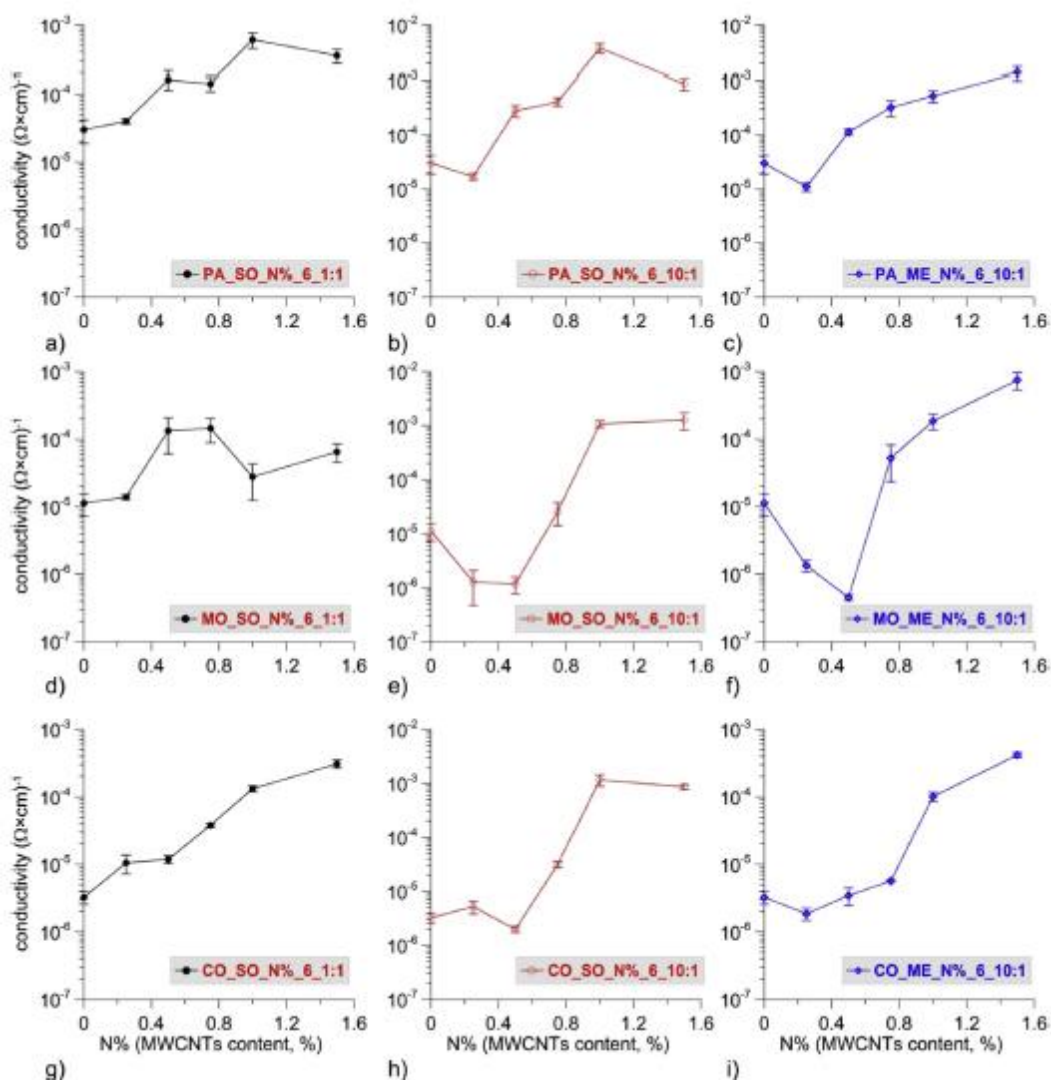
Ilustración 2-6 Evolución de la conductividad eléctrica con el tiempo para el ensayo DC (D'Alessandro, Rallini, Ubertini, Materazzi, & Kenny, 2015)

En el ensayo AC (Ilustración 2-7) mostró claramente un **límite de percolación en torno al 1% de MWCNTs**, con unos valores similares de conductividad tanto para el mezclado mecánico como por sonicación. La concentración 10:1 de dispersante se identificó como la más favorable.

La aparición de **percolación se mostró menos evidente en el caso de pasta de cemento**, debido a la pequeña contribución eléctrica de los MWCNTs y porque la propia respuesta del material frente a percolación es diferente, ya que en el caso de la pasta de cemento no tiene lugar el doble fenómeno de percolación.



## Memoria



**Ilustración 2-7** Variación de la conductividad eléctrica con el contenido de MWCNTs según el ensayo AC (D'Alessandro, Rallini, Ubertini, Materazzi, & Kenny, 2015)

### 3) Ensayo de compresión

Los diferentes sensores se sometieron a un test de compresión axial para determinar la sensibilidad de los mismos, y cuán de precisos resultan ser. Para ello se les aplica un ciclo de carga y descarga, con una amplitud mínima de 0.2 MPa y una amplitud máxima de 0.8 MPa.

Para obtener las deformaciones “reales”, y tener una idea de la veracidad de los valores obtenidos, se usaron dos galgas colocadas en las caras opuestas.

La deformación obtenida con los sensores se calcula mediante la Ecuación 2-4.

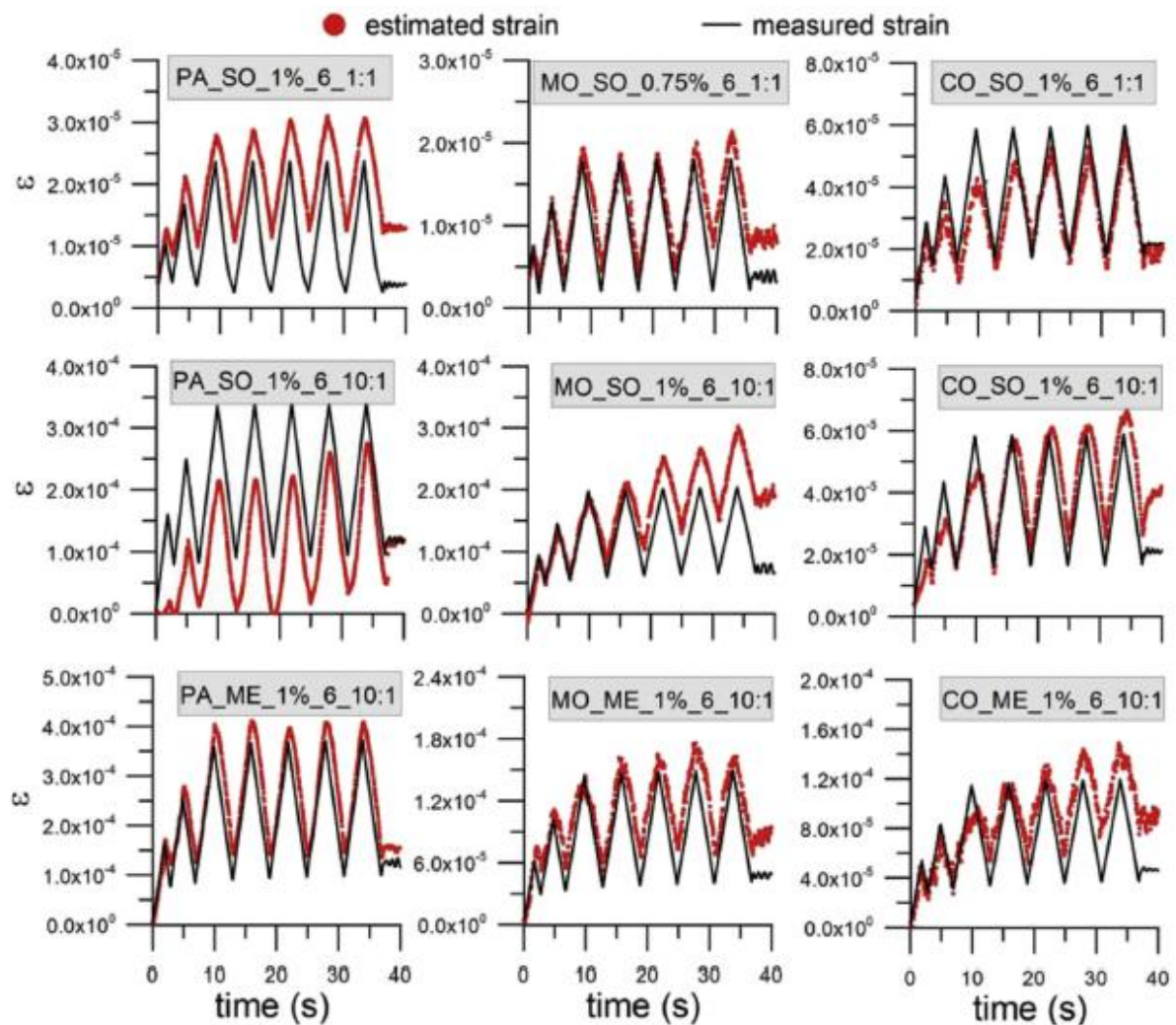
**Memoria**

$$\varepsilon(t) = \frac{V}{\lambda R_0 \Delta I(t)}$$

**Ecuación 2-4 Deformación de los sensores en función del tiempo**

En el análisis de los resultados de los ensayos se apreció como aparentemente el incremento de deformación se estima correctamente con todas las muestras, pero la lenta variación de la resistencia eléctrica asociada con diferentes niveles de polarización puede impedir la estimación del valor absoluto de la deformación.

Otra conclusión que se extrajo es que el mezclado mecánico ofrece mejores resultados, así como las muestras que usaban una pasta de cemento. Así pues, como conclusión, se podría decir la pasta de cemento por mezclado mecánico con 1% de CNTs y dispersante SLS en concentración 10:1 arroja los mejores resultados.



**Ilustración 2-8** Historial de deformación estimada y medida para las muestras de pasta de cemento, mortero y hormigón. (D'Alessandro, Rallini, Ubertini, Materazzi, & Kenny, 2015)

**Memoria**

Como conclusión a los diferentes estudios llevados a cabo por A. D'Alessandro y su equipo podemos decir que un factor determinante en la dispersión de los CNTs es el tipo de mezclado, además del tipo y cantidad de dispersante usado. Clara e indiscutiblemente el mejor método para conseguir una dispersión óptima es la sonicación. Sobre el dispersante, el que destaca es el SLS con una concentración de 10:1. Otro factor muy importante es la percolación, ya que a partir de cierta cantidad de nanotubos el material se vuelve conductor y no cumple con la función deseada. Esa cantidad se denomina límite de percolación, y se sitúa en torno al 1% en peso de la masa de cemento. Por último podemos hablar de la claridad y concordancia de la señal obtenida, presentando en este caso la pasta de cemento los mejores resultados, en parte debido a la ausencia de áridos que podrían interferir en la señal y generar ruido.

**Memoria**

### 3 NANOTUBOS DE CARBONO<sup>4</sup>

#### 3.1 Definición y tipos

Los nanotubos son estructuras tubulares cuyo diámetro es del orden de los nanómetros, y con una elevada relación longitud/radio, por lo que se llegan a considerar unidimensionales. Pueden ser de varios materiales, como el silicio o el nitruro de boro, pero los de carbono son los más usuales. Según la geometría y el grado de enrollamiento se puede distinguir entre los **nanotubos monocapa o de pared simple (SWCNT)**, que consisten en un cilindro de una sola capa, y los **nanotubos multicapa (MWCNT)**, que están formados por varias capas o cilindros. Hay derivados en los que el tubo está cerrado por media esfera de fullereno.

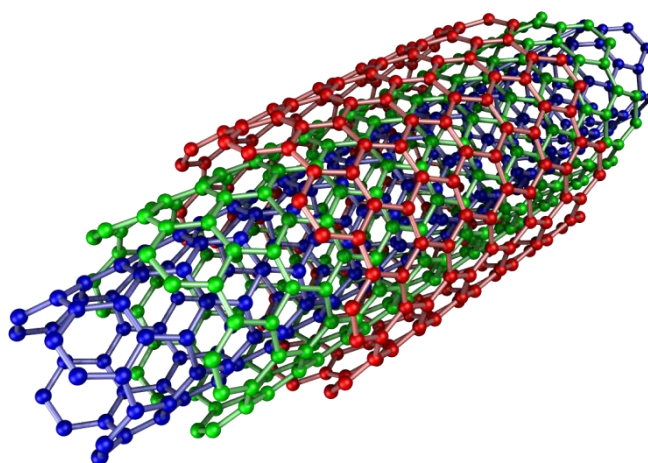


Ilustración 3-1 MWCNT (Wieser, E.)

Dentro de los MWCNTs podemos encontrar dos tipos diferentes: los **muñeca rusa**, que consisten en varias capas concéntricas una dentro de otra, y los **pergamino**, que son una sola hoja o lámina enrollada sobre sí misma, como si de un pergamino se tratase.

#### 3.2 Propiedades de los nanotubos

En cuanto a las propiedades de los nanotubos, merece destacar las tres siguientes:

**1) Propiedades eléctricas:** Presentan una gran complejidad electrónica, de manera que existen desde nanotubos semiconductores hasta superconductores. Este amplio margen de conductividades viene dado

---

<sup>4</sup> (Peláez Lodoño, 2009)

principalmente por su relaciones geométricas. En cuanto a su capacidad de transportar corriente, en el caso de los superconductores, es de mil millones de  $A/cm^2$ , que para tener un orden de magnitud, el cobre convencional funde en torno al millón.

**2) Propiedades mecánicas:** Los enlaces  $sp^2$  entre los átomos de carbono que conforman los CNTs les confieren una gran robustez y estabilidad, siendo actualmente la fibra más resistente que se puede fabricar. Por otro lado, son capaces de deformarse notablemente y de mantenerse en un régimen elástico. Su módulo de Young está en torno a 1.3 – 1.8 terapascales.

**3) Propiedades térmicas:** La conductividad térmica a temperatura ambiente puede llegar a ser de 6000 W/mK, muy superior, por ejemplo, a la del diamante, que es de 3320 W/mK. Además, también presenta una gran estabilidad térmica.

### 3.3 Reseña histórica

A principios de los noventa, **Sumio Lijima** observó por medio de un microscopio electrónico en el laboratorio de Investigación Fundamental de NECen Tsukuba unas fibras tubulares de tamaño nanoscópico, con longitud era extremadamente superior a su diámetro, sobre una mota de hollín. Estas fibras estaban constituida por carbono, y presentaban una simetría y regularidad propias de un cristal. Debido a su geometría en forma de tubo recibieron el nombre de **nanotubos de carbono (CNTs)**. La elasticidad, la resistencia a la tracción o la estabilidad térmica son algunas de las propiedades destacables de los CNTs, aunque el principal interés en ellos radica en sus propiedades eléctricas.

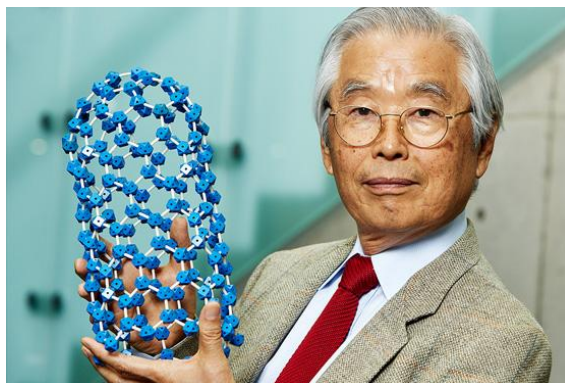


Ilustración 3-2 Samio Lijima ([www.epo.org](http://www.epo.org))

Los nanotubos que observó Lijima en 1991 eran los llamados **nanotubos de paredes múltiples (MWCNTs)**. Estos CNTs están formados por varias capas cilíndricas de átomos de carbono, una dentro de otra. Dos años más tarde, Lijima y Donald Bethune crearon los **nanotubos de pared única (SWCNTs)**,



que como su nombre indica, están formados por una sola capa de átomos de carbono.

Los átomos de carbono se encuentran dispuestos en forma de anillos hexagonales, la misma estructura del grafito. De hecho, un CNT parece una lámina de grafito enrollada en un cilindro sin costuras.

En general, las principales investigaciones sobre CNTs se están llevando en el campo de la electrónica, ya que los nanotubos de carbono pueden desempeñar el mismo papel que el silicio cumple en los circuitos electrónicos, pero a escala molecular, donde el silicio y otros semiconductores dejan de funcionar. IBM es la empresa que más está apostando por las investigaciones en este campo.

### **3.4 Fabricación de nanotubos**

El hombre del Neandertal ya fabricaba nanotubos en pequeñas cantidades. En las hogueras, los átomos de carbono se recombinan en el hollín, dando lugar a tres geometrías distintas: glóbulos amorfos, esferas o “buckybolas” y los nanotubos o “buckytubos”. Actualmente existen tres métodos diferentes para conseguir hollín con una notable cantidad de CNTs, pero todos ellos presentan el mismo inconveniente, y es que producen nanotubos de longitudes muy diversas y con muchos defectos.

#### **3.4.1 Descarga de arco voltaico**

Este método fue desarrollado en 1992 por Thomas Ebbeser y Pullickel M. Ajayan. Se colocan dos barras de grafito separadas unos milímetros, y se hace saltar una chispa de 100 A entre ellas. Entonces el carbono se evapora en un plasma caliente, y parte del mismo se vuelve a condensar en forma de nanotubos.

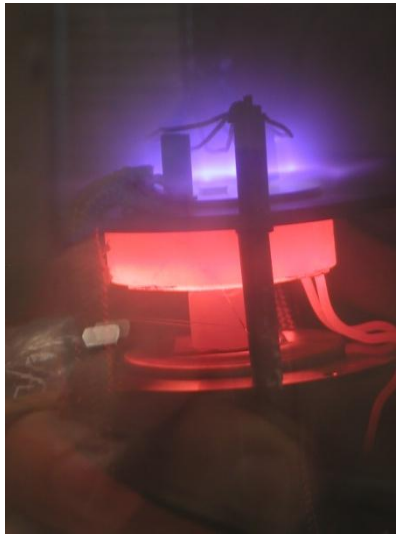
Con este método se consigue un rendimiento del 30 % en peso. La principal ventaja es que pueden producirse SWCNTs y MWCNTs con pocos defectos. Por el contrario, los tubos tienden a ser cortos, unas 50 micras, y a depositarse en forma y tamaños aleatorios.

#### **3.4.2 Deposición química de vapor (CVD)**

Esta técnica, propuesta por Morinubo Endo, de la Universidad de Shinshu, consiste en calentar un sustrato, que normalmente es una chapa de metal (generalmente de níquel, cobalto u oro) a 600 °C y añadir metano, de forma que se libera átomos de carbono que pueden recombinarse dando lugar a nanotubos.

### **Memoria**

Se llegan a conseguir rendimiento en torno al 20 %. Es el método más sencillo de los tres y permite obtener CNTs bastante largos, pero la mayoría de ellos son de pared múltiple con numerosos defectos.



**Ilustración 3-3 Reactor CVD para crecimiento de nanotubos inducidos por plasma (Wikipedia)**

#### **3.4.3 Ablación láser**

Con pulsos de láser aplicados a barras de grafito se genera un gas caliente de carbono que da lugar a los nanotubos. Se llega a conseguir un rendimiento del 70 % en peso usando los catalizadores adecuados.

Como punto positivo podemos decir que este método permite obtener nanotubos de pared única con una amplia gama de diámetros variando la temperatura de la reacción. Como punto negativo está el elevado coste de los láseres.



## 4 PRINCIPIO FÍSICO DE LA MEDIDA CON SENSORES DE CEMENTO CON CNTs

La elaboración de sensores con el objetivo de llevar a cabo una monitorización estructural se basa en dopar unas pequeñas probetas de pasta de cemento<sup>5</sup> con nanotubos de carbono, en concreto con nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNTs). Los CNTs mejoran la conductividad eléctrica de la pasta de cemento, de forma que un cambio en el estado tensional del sensor da lugar a una variación de la resistencia eléctrica, siendo dicha variación proporcional a la deformación sufrida por el sensor. Es decir, se ha conseguido un sensor cuyo comportamiento es similar al de una galga extensométrica al uso, y que por lo tanto, responde a la *ecuación fundamental de la extensometría* (ver Ecuación 4-1):

$$\frac{\Delta R}{R_0} = -\lambda \varepsilon$$

**Ecuación 4-1 Ecuación fundamental de la extensometría**

donde  $R_0$  es la resistencia eléctrica inicial,  $\varepsilon$  la deformación unitaria y  $\lambda$  el llamado factor de galga, que no es más que un factor de proporcionalidad entre la variación de la resistencia eléctrica y la deformación.

La capacidad de variar la resistencia eléctrica según el estado de tensiones al que se encuentra sometido el sensor está estrechamente relacionada con su conductividad eléctrica. La cantidad óptima de nanotubos es la del límite de percolación, que suele estar en torno al 1% en masa de cemento. Podemos definir pues el concepto de **sensibilidad (S) del sensor** según la Ecuación 4-2:

$$S = \frac{\Delta R}{\varepsilon} = -\lambda R_0$$

**Ecuación 4-2 Sensibilidad**

Por lo tanto, el contenido óptimo de nanotubos será aquel para el que la sensibilidad sea máxima. Si el contenido de CNTs es mayor al óptimo, el material alcanza la percolación y se vuelve conductor, con lo que la resistencia ( $R_0$ ) baja, y por ser esta directamente proporcional a la sensibilidad, provoca que disminuya dicha sensibilidad. Por el contrario, si el contenido es menor, la distancia entre los nanotubos es demasiado grande, por lo que la sensibilidad es menor (baja  $\lambda$ ).

<sup>5</sup> También se puede emplear mortero u hormigón en lugar de pasta de cemento.

Sin embargo, se plantean dos problemas en la elaboración de los sensores, los cuales son la **dispersión** y la **percolación**. Cuando se añade los CNTs al agua no se dispersan adecuadamente, sino que dan lugar a una serie de aglomeraciones o cúmulos en forma de bolas, por lo que es necesario llevar a cabo técnicas de mezclado inusuales, como la sonicación, para conseguir una buena dispersión. Estas aglomeraciones se forman debido a la configuración electrónica de los nanotubos y a su elevada superficie específica, que dan lugar a unas fuerzas de Van der Waals de atracción.

La percolación consiste en que el sensor se vuelve totalmente conductor por un exceso de CNTs, por lo cual, ya no se puede evaluar los cambios en su conductividad eléctrica adecuadamente. La forma de evitar este fenómeno es puramente empírica, y consiste en realizar previamente ensayos con el objetivo de determinar la cantidad máxima de nanotubos admitida, conociéndose dicha cantidad como **límite de percolación**.

Los sensores son, aunque su forma es indiferente, un cubo de lado aproximadamente 5 cm a los que se le ha introducido varios electrodos que consisten en una malla de acero inoxidable. En la Ilustración 4-1 se muestra un sensor, con sus electrodos y conectado al equipo de adquisición de datos por medio de los cocodrilos.

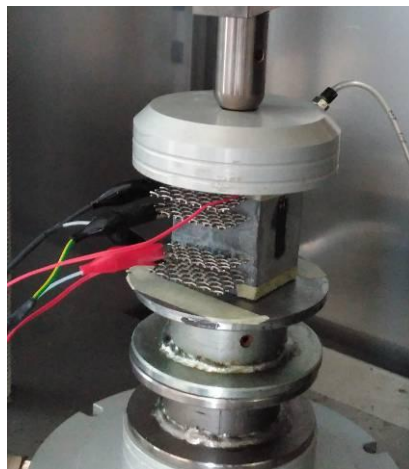


Ilustración 4-1 Sensor sometido a un ciclo de compresión (Ubertini & D'Alessandro, 2016)

#### 4.1 Sistemas de conexión de electrodos

Los sensores que se han elaborado en el presente estudio cuentan con cinco electrodos, tal y como se detalla en el apartado 5.1. Estos electrodos se conectan a dos terminales de varias formas distintas, bien por medio de pinzas tipo cocodrilo (Ilustración 4-2), bien mediante una soldadura con estaño o empleando unas fichas de empalme (Ilustración 4-3).

**Memoria**



**Ilustración 4-2 Conexión mediante pinzas tipo cocodrilo**

Tras realizar varias pruebas a un sensor cedido por Perugia, el cual contaba con solo cuatro electrodos, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Durante los ensayos en los que el sensor está en movimiento es conveniente evitar la conexión mediante cocodrilos, ya que un pequeño desplazamiento de los mismos da lugar a una variación de la resistencia eléctrica, falseando así las medidas obtenidas.
- En estos casos, es conveniente usar clemas o fichas de empalme (Ilustración 4-3), en lugar de soldadura, ya que se simplifica enormemente el proceso de conexión y desconexión.
- Sin embargo, para ensayos estáticos, en los que el sensor se encuentra en reposo, es totalmente aceptable el uso de cocodrilos, adoptando las debidas precauciones para que el sensor no se mueva accidentalmente.

## Memoria



Ilustración 4-3 Conexión mediante ficha de empalme

Puesto que se cuenta con cinco electrodos (aunque en esta prueba se usó un sensor de cuatro electrodos) y dos terminales, hay una gran combinación de maneras de realizar la conexión. Se ha diferenciado dos combinaciones:

- a) **Tipo 1:** usando los electrodos extremos, conectando cada uno de ellos a un terminal (Ilustración 4-4).

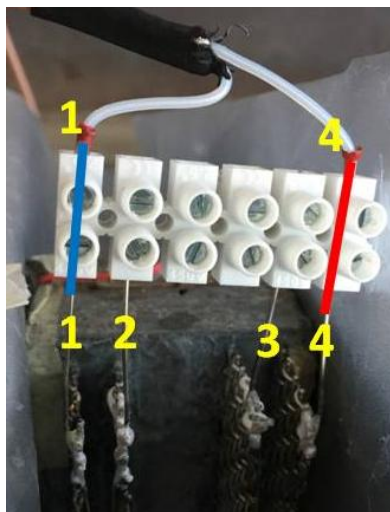
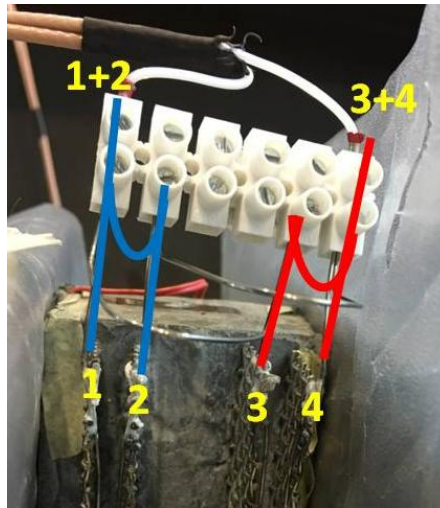


Ilustración 4-4 Conexión Tipo 1

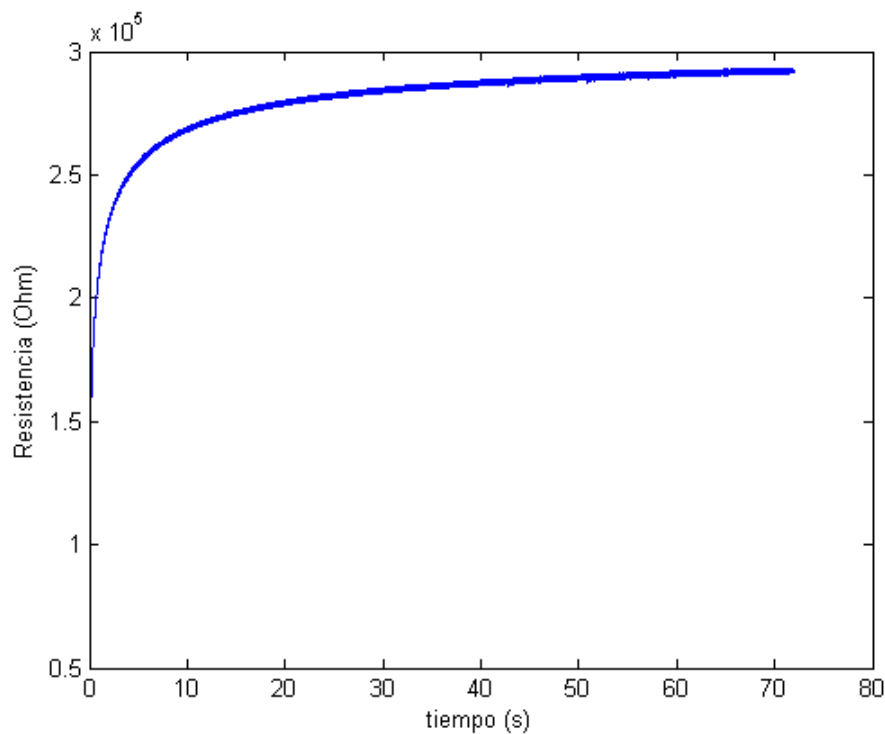
- b) **Tipo 2:** conectando el primer y segundo electrodo a un terminal, y el tercer y cuarto a otro (Ilustración 4-5).

**Memoria**

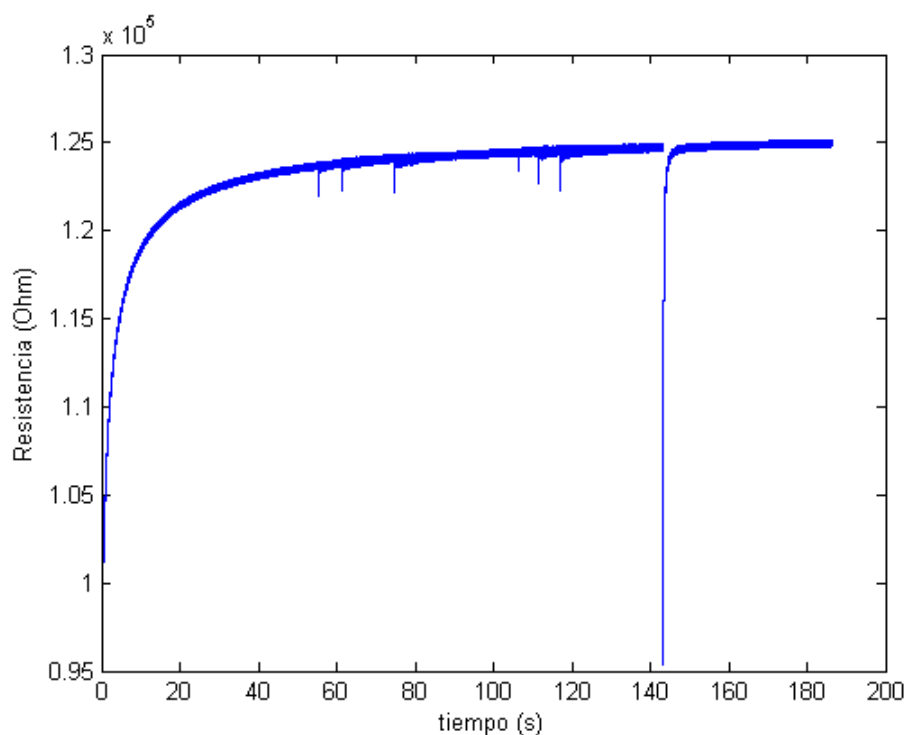


**Ilustración 4-5 Conexión Tipo 2**

Con cada una de estas conexiones se realizó una prueba para detectar la frecuencia propia de una viga en voladizo. Esta parte no es importante en este punto, siendo detallada en el apartado 7, lo que sí importa es que para ello se dio tres golpes a dicha viga, los cuales se deben de reflejar perfectamente en una gráfica que muestra como varía la resistencia en función del tiempo. El criterio para elegir cómo conectar los electrodos es el de la sensibilidad, es decir, se ha elegido el tipo de conexión con el que mejor se aprecian los golpes.



**Ilustración 4-6 Variación de la resistencia para la conexión Tipo 1**



**Ilustración 4-7 Variación de la resistencia para la conexión Tipo 2<sup>6</sup>**

Como puede verse en la gráfica de la Ilustración 4-6, con la conexión Tipo 1 no se aprecia ningún golpe, ya que no hay cambios bruscos y repentinos de la resistencia. Por tanto, este conexionado ofrece una sensibilidad pésima. En cambio, en la Ilustración 4-7 sí que puede apreciarse perfectamente dos series de tres golpes, que se ven perfectamente reflejados por esos dos grupos de tres picos en la resistencia cada uno. Así pues, en este caso se cuenta con una excelente sensibilidad.

Esto hace pensar si la conexión Tipo 2 presenta siempre una sensibilidad superior a la Tipo 1, o se trata de una casualidad. Esta cuestión será analizada más adelante.

<sup>6</sup> El pico grande pasado los 140 segundos se debe al código usado para el tratamiento de los datos en Matlab, por lo que no indica ningún cambio en la resistencia en ese instante.

## 5 FABRICACIÓN DE SENSORES DE CEMENTO CON CNTs

### 5.1 Diseño del sensor

La forma de los sensores consiste en un cubo de 50 mm de lado, teniendo en cuenta que esta medida puede verse ligeramente alterada, ya que se obtienen por un proceso de moldeo. En los sensores se introducen cinco electrodos a una profundidad de 35 mm, y separados entre ellos 8 mm (medido desde el eje). En la Ilustración 5-1 puede verse como quedan los electrodos una vez introducidos.

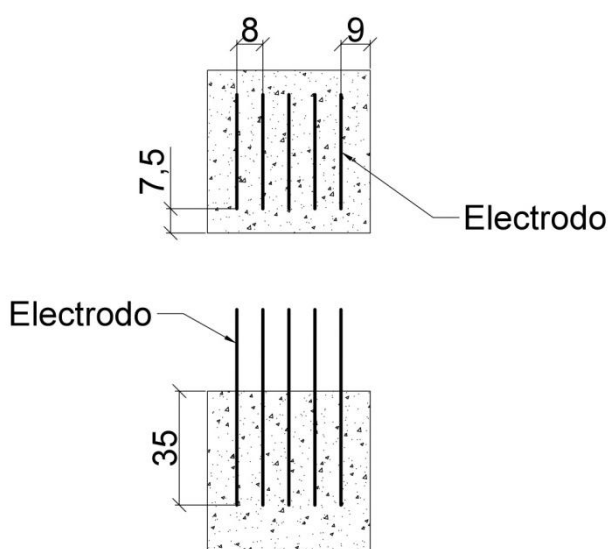


Ilustración 5-1 Sensor con los electrodos introducidos

Los electrodos consisten en una malla de acero inoxidable de diámetro 1 mm que forma una retícula cuadrada de 5 mm (medidos en el eje). Las dimensiones de cada electrodo son de 35 mm de ancho por 80 mm de alto, sin ser la altura una medida fundamental, pues lo importante es la profundidad introducida en el sensor.

Para obtener esta geometría se recurre a un proceso de moldeo. Tras realizar la amasada se vierte la pasta aún fresca en los moldes, los cuales presentan unas dimensiones adecuadas para obtener cubos de 50 mm, que tras fraguar y endurecer durante el tiempo necesario dará lugar a los sensores con la geometría descrita.

#### 5.1.1 Elección del molde

En primer lugar, para la fabricación de los moldes se puso el foco de atención en los usados por la Universidad de Perugia. Estos consistían en unos perfiles



## Memoria

en U con unas pletinas a modo de separadores y para controlar la altura (Ilustración 5-2).



Ilustración 5-2 Molde usado por Perugia (D'Alessandro, A.)

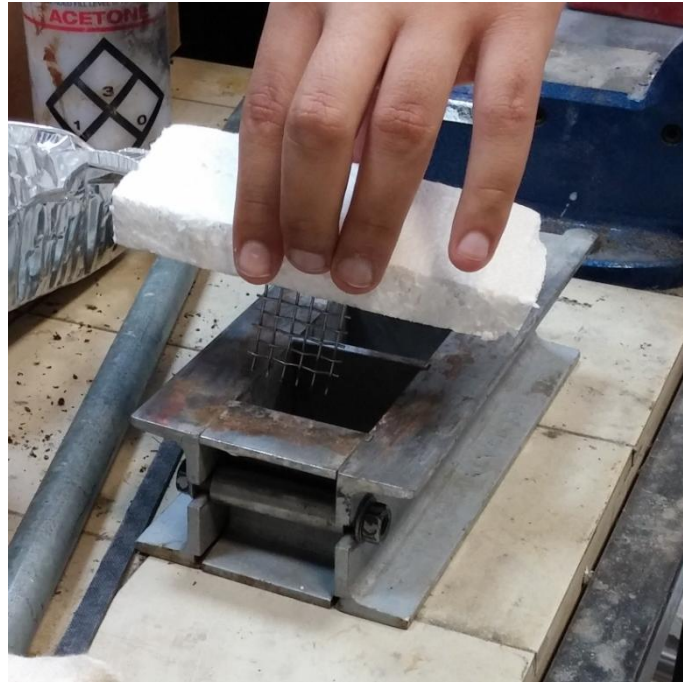
Siguiendo por esta línea de proceder igual que el equipo italiano, se analizó cómo introducían los electrodos, y pronto se vio que su forma de introducción no aseguraba el paralelismo necesario entre los electrodos. Usaban un trozo de poliestireno expandido (conocido popularmente como “corcho blanco”) en el cual dibujaban una plantilla con la posición de los electrodos (Ilustración 5-3). Luego clavaban los electrodos en sus posiciones y los introducían en el molde (Ilustración 5-4). Así pues, en la fase de introducción en el molde, la malla se puede mover, pues el poliestireno se desgrana fácilmente, y perder el paralelismo.



Ilustración 5-3 Colocación de los electrodos en el poliestireno expandido (D'Alessandro, A.)

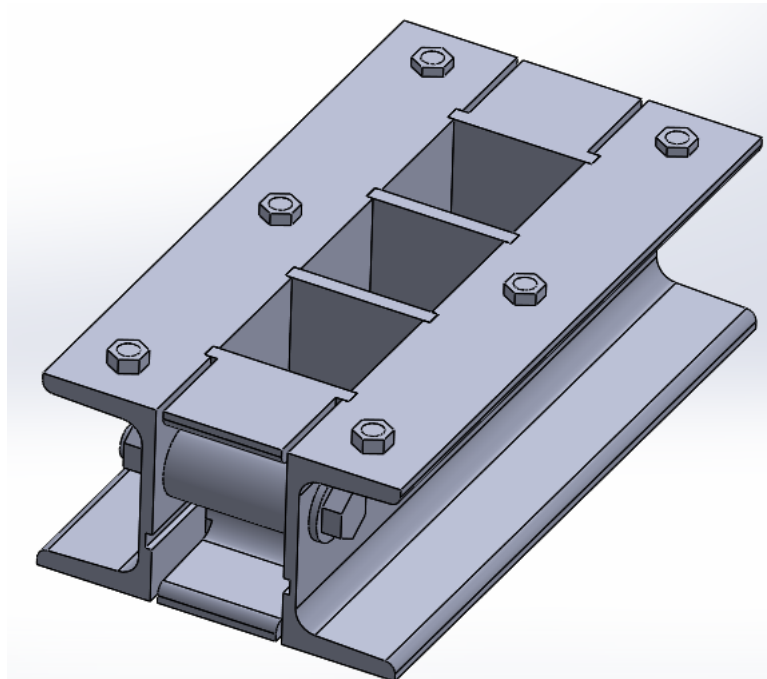


**Memoria**



**Ilustración 5-4 Introducción de los electrodos en el molde (D'Alessandro, A.)**

A partir de lo expuesto, se pensó en fabricar el mismo tipo de molde con perfiles en U, pero mejorando la introducción de los electrodos con dos láminas metálicas a modo de plantilla a diferente altura, que sí cercioran el paralelismo entre electrodos. En el Anexo B puede consultarse sus planos de fabricación. Estos moldes quedarían tal y como se ve en la Ilustración 5-5, Ilustración 5-6 y Ilustración 5-7.



**Ilustración 5-5 Molde U (1)**

**Memoria**

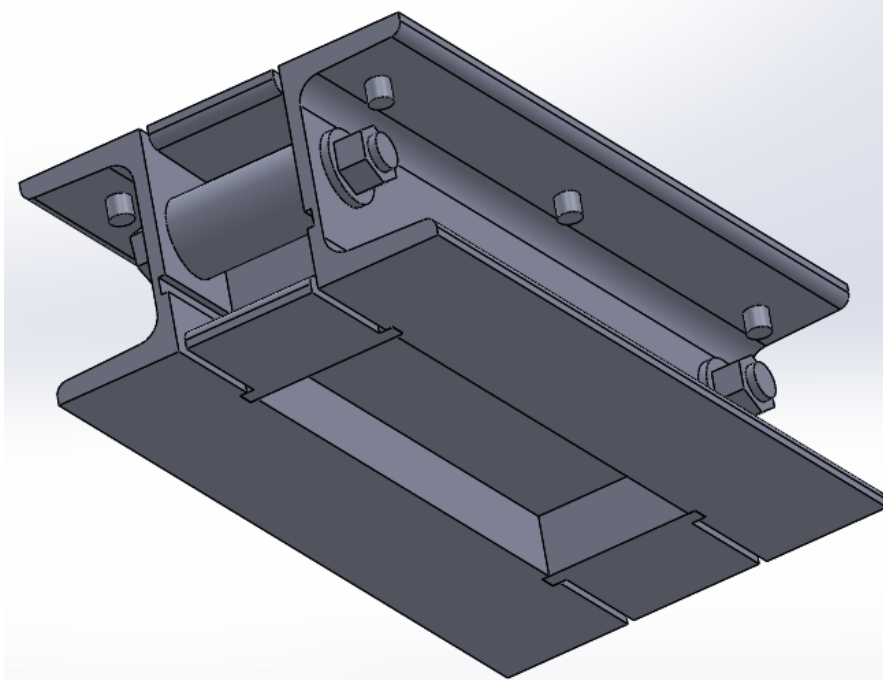


Ilustración 5-6 Molde U (2)

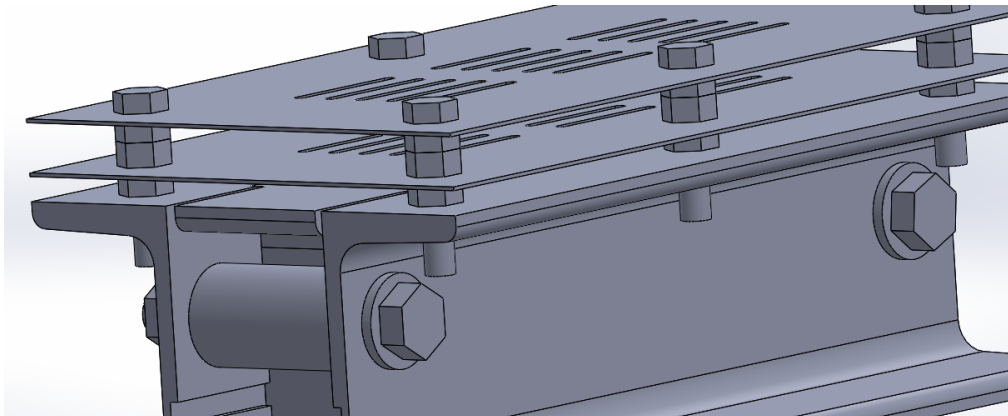


Ilustración 5-7 Molde U (3)

A pesar de que esta solución puede darse por válida y satisfactoria, con el transcurrir del tiempo se pusieron de manifiesto varios inconvenientes:

- Proceso de fabricación muy laborioso y lento, puesto que requiere de multitud de operaciones de fresado, entre otras.
- Elevado coste de los materiales, más aún teniendo en cuenta que se necesitarían como mínimo tres moldes.
- De los dos inconvenientes anteriores se deriva el tercero, y es la imposibilidad de obtener un gran número de sensores en cada amasada, de forma que se agilice el estudio y caracterización de los mismo, ahorrando tiempo.
- Dificultad en el manejo de los moldes, debido, en gran parte, a su peso.

## Memoria

Por lo anteriormente expuesto, se diseñó otra alternativa apoyada fundamentalmente en perfiles de fibra de vidrio de 50 mm. Estos nuevos moldes consisten en un tablero laminado usado como base, sobre el cual se monta dos perfiles L50 (Ilustración 5-8) distanciados 50 mm por medio de unos separadores fabricados a partir de un perfil cuadrado de 50 mm (Ilustración 5-9).

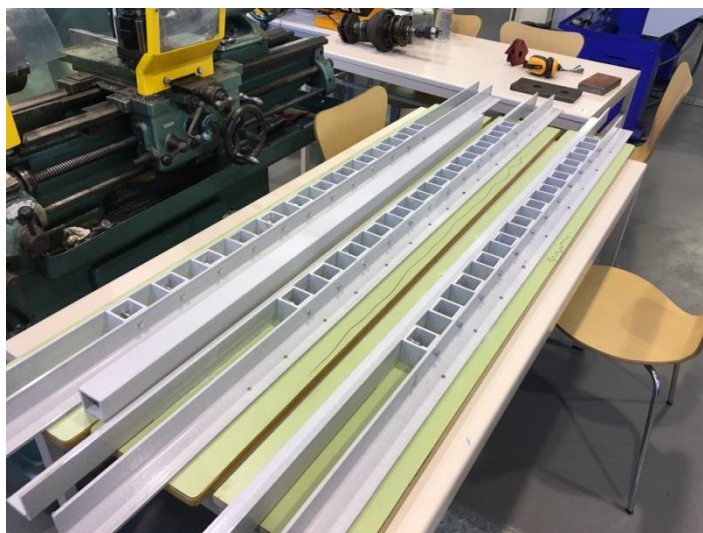


Ilustración 5-8 Moldes usados

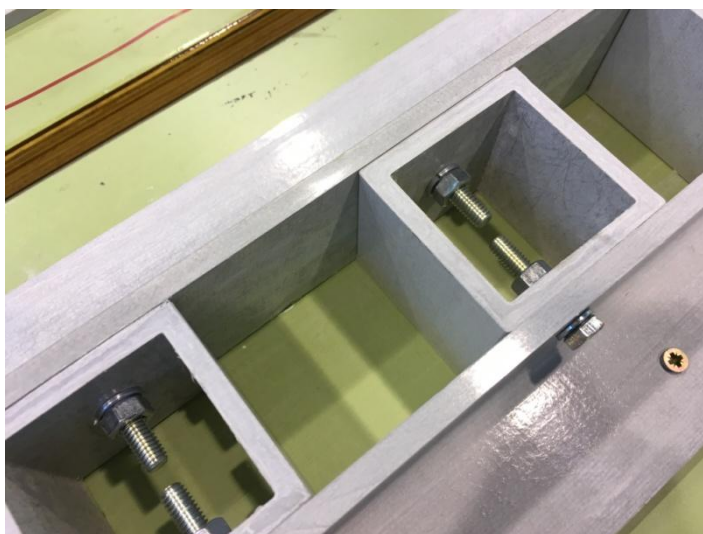
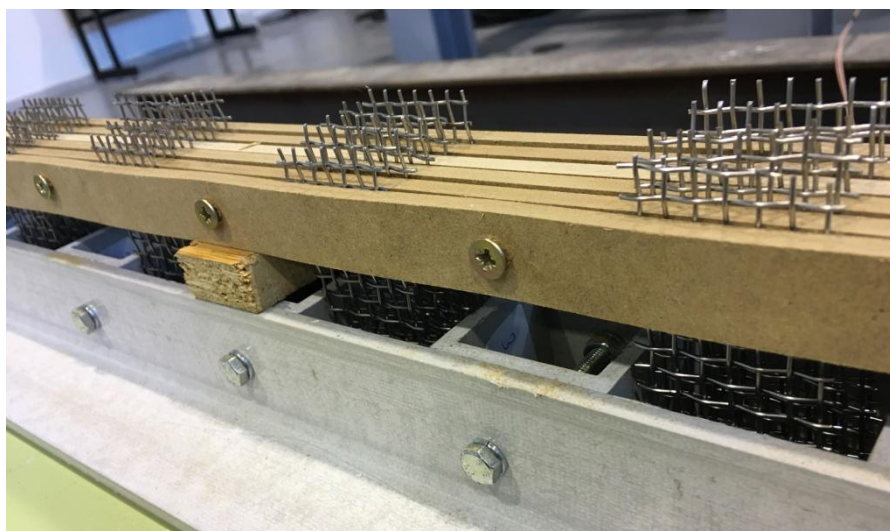


Ilustración 5-9 Detalle de los moldes usados

Para solventar el problema del paralelismo de los electrodos se ha empleado unas guías consistentes en listones de DM, con un espesor de 6 mm, el cual controla la separación, y una anchura de 20 mm. Se ha dispuesto seis listones, entre los cuales se ha introducido los electrodos, uniéndolos posteriormente dichos electrodos con tirafondos, de forma que los electrodos quedan todos paralelos e igualmente separados (Ilustración 5-10). La posición del electrodo se fija por el rozamiento conseguido al comprimirlo entre los listones.



**Ilustración 5-10 Listones separadores de electrodos**

El último factor clave a controlar es la profundidad, para lo que se ha empleado una serie de calzos. A la hora de colocar los electrodos se han puesto de manera que la distancia libre inferior sea de 50 mm (la profundidad total), y al usar los calzos de 15 mm (consistentes en tablero de madera aglomerada) se ha conseguido que penetren los citados electrodos 35 mm. Dicho calzo se puede apreciar en la Ilustración 5-10.

En el apartado 5.1.2, donde se detalla el proceso de fabricación y montaje de los moldes paso a paso, puede encontrarse más detalles sobre los mismos.

### **5.1.2 Fabricación de los moldes**

En el presente apartado se detallará paso a paso el proceso seguido para la fabricación y obtención de los moldes elegidos finalmente, que son los correspondientes a la Ilustración 5-8. Se han fabricado tres moldes, cada uno de ellos con una capacidad de 11 sensores. Decir también que estos moldes son fácilmente reutilizables para distintas amasadas, y que todas sus partes se encuentran debidamente marcadas para facilitar las operaciones de montaje posteriores, ya que cada pieza y elemento está identificado.

En primer lugar, a partir de un patrón de longitud, se cortó el perfil cuadrado de 50 mm usando un sierra de cinta, obteniendo así los separadores (Ilustración 5-11). También se cortaron cuatro separadores, pero de longitud 200 mm para ayudar en el montaje. A estas cuatro piezas las llamaremos extractores.



## Memoria

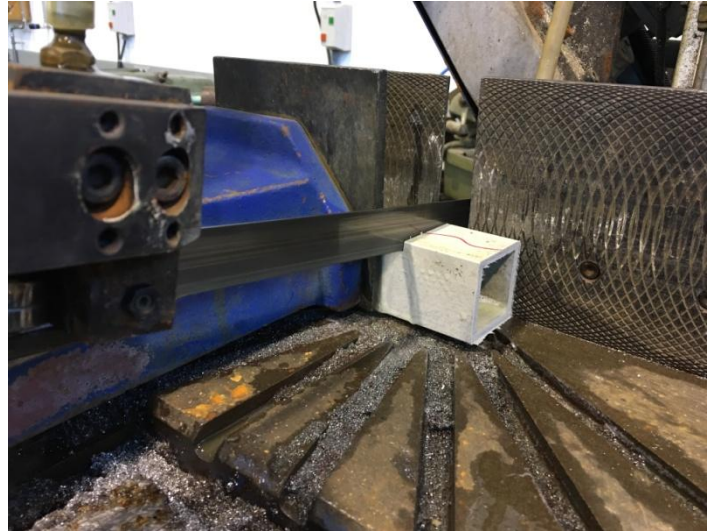


Ilustración 5-11 Corte de separadores

Después se dispone los dos perfiles L50 en el tablero, separados 50 mm (Ilustración 5-12), y se sella la unión con masilla de carroceros (Ilustración 5-13) con dos motivos, el primero de ellos es obtener una arista viva en el sensor, y el segundo impermeabilizar para evitar que la pasta de cemento se filtre. Posteriormente se fija una de las L a la base con tirafondos. Esta L permanecerá fija, mientras que la otra es desmontable para facilitar el desmoldeo de los sensores.



Ilustración 5-12 Colocación de perfiles L50 separados 50 mm

## Memoria



**Ilustración 5-13 Detalle sellado con masilla de carroceros**

A continuación se montan los separadores con la ayuda de los extractores. Se dispone de un separador seguido de un extractor, el cual simula el hueco ocupado por el sensor. Fijando la posición de los extractores con sargentos, que ayudan a que la distancia se mantenga constante de 50 mm, se taladran los separadores y se inmovilizan usando unos tornillos, tuercas y arandelas (Ilustración 5-14).



**Ilustración 5-14 Montaje de los separadores**

Una vez está el molde listo se procede a fabricar los separadores para colocar los electrodos. Se colocan unos cartoncitos en el interior del molde, los cuales aseguran que el electrodo no llega a la superficie. Seguidamente se empiezan a colocar electrodos y listones separadores (Ilustración 5-15). Una vez que están todos los electrodos colocados en su sitio, y perfectamente centrados, se inmovilizan los seis listones con varios sargentos y se procede a unirlos solidariamente con unos tirafondos (Ilustración 5-16).

## Memoria

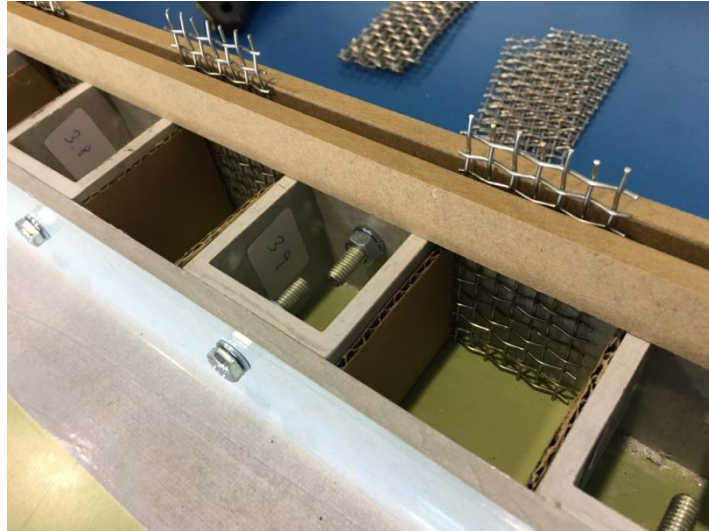


Ilustración 5-15 Montaje separadores de los electrodos

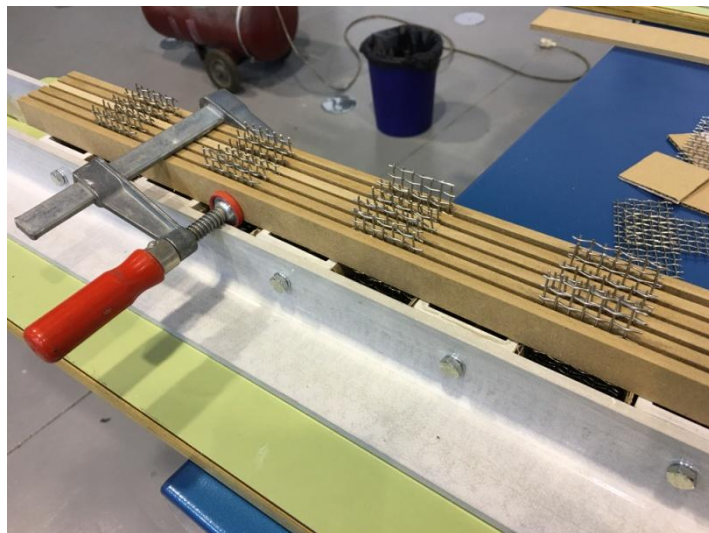


Ilustración 5-16 Unión de los listones separadores

A los listones se atornilla por cada extremo dos rectángulos de madera que ayudan a colocar el sistema en su posición (Ilustración 5-17). Uno de ellos hará tope con el primer separador para indicar la posición, y el otro mantiene el paralelismo a los perfiles L50. Luego, para que la longitud penetrada en el sensor sea de 35 mm se calzan los listones con unos tacos de aglomerado de 15 mm de grosor.



## Memoria



Ilustración 5-17 Colocación de rectángulos guía

Por último, para reducir el efecto de la flexión de los listones, se dispone de varias guías que consisten en unos suplementos de madera sujetos con sargentos (Ilustración 5-18).



Ilustración 5-18 Guía para impedir la flexión de los listones

## 5.2 Dispersión de los nanotubos mediante sonicación

### 5.2.1 Técnica de sonicación

La **sonicación** es proceso que consiste en aplicar ultrasonidos a una mezcla para agitar sus partículas, y conseguir, por ejemplo, una mejor dispersión de ellas. Los ultrasonidos generan una alternancia de altas y bajas presiones (compresión y vacío) que logran romper el efecto de las fuerzas de atracción de los CNTs, como las fuerzas de Van der Waals.



## Memoria

El problema es que se da un proceso de **cavitación** en el líquido (Ilustración 5-19), ya que se generan millones de burbujas microscópicas que sufren un proceso de expansión y colapso. La cavitación provoca, localmente, temperaturas de hasta 5000 kelvin, presiones de hasta 2000 atm y chorros de líquido que pueden alcanzar los 1000 km/h.



Ilustración 5-19 Cavitación en el proceso de sonicación (Hielscher Ultrasonics GmbH, 2017)

En un equipo de sonicación típico podemos distinguir los siguientes elementos (Ilustración 5-20):

- 1) Transductor.** Se encarga de convertir la energía eléctrica en energía mecánica en forma de ultrasonidos según los parámetros introducidos por el usuario. Se encuentra ubicado en una carcasa de aluminio.
- 2) Generador.** Recibe la energía eléctrica de la red y la envía convenientemente al transductor. En el generador también encontramos el sistema de control del proceso: pantalla para introducir los datos, puertos de entrada y salida...
- 3) Sonotrodo.** Transfiere la onda sonora del transductor al medio que va a ser sonicado. En la Ilustración 5-21 se puede ver un sonotrodo del equipo usado en el ensayo.

## Memoria

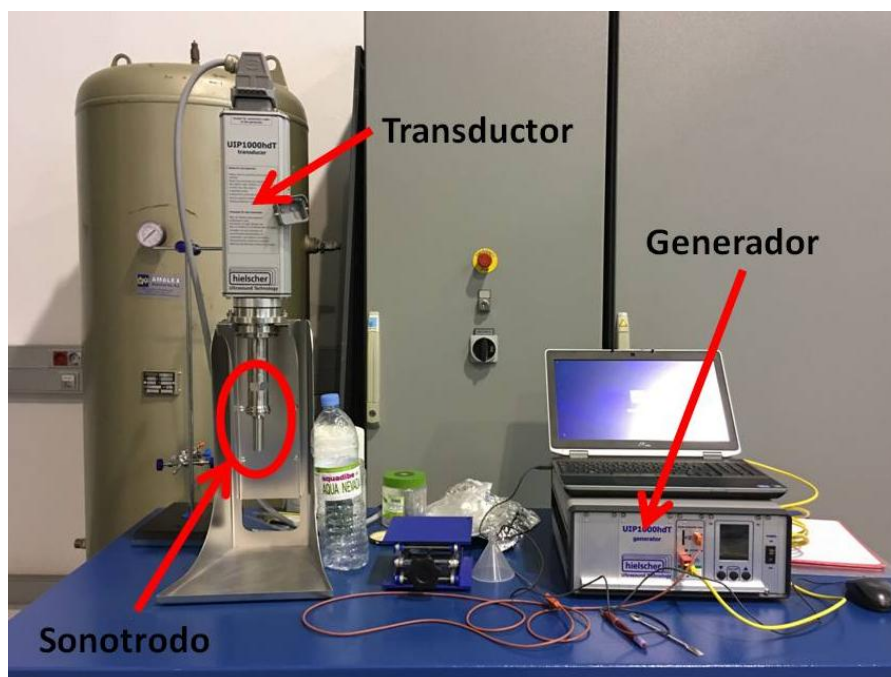


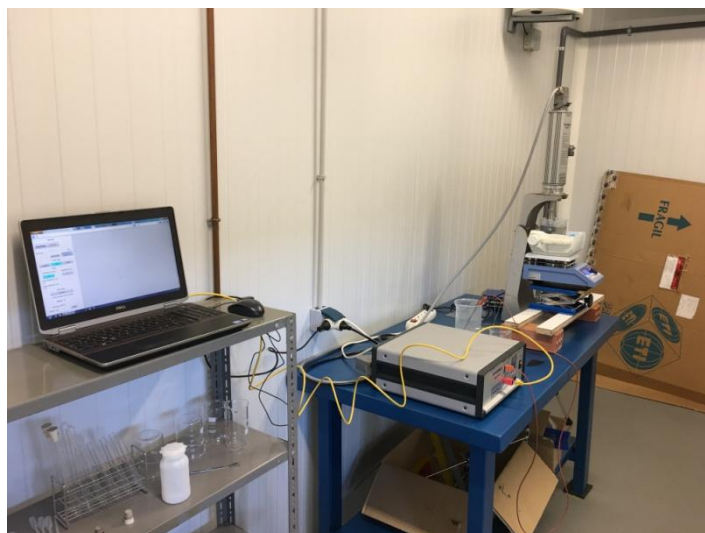
Ilustración 5-20 Elementos de un sonicador Hielscher UIP 1000 hdT.



Ilustración 5-21 Sonotrodo

Es muy importante tener en cuenta que la intensidad de la sonicación depende de la energía aportada y del área del sonotrodo. Así, para una misma cantidad de energía aplicada, cuanto mayor sea la superficie del sonotrodo, menor será la intensidad de los ultrasonidos. Por eso es muy importante elegir el sonotrodo correcto. Mediante el uso de **boosters** la energía ultrasónica generada puede ser aumentada o disminuida.

En el ensayo llevado a cabo se ha usado un sonicador Hielscher UIP 1000 hdT, con una potencia máxima de 1000 W y una frecuencia de onda de 20 kHz. El sonotrodo seleccionado es el BS4d18, y no se empleó ningún booster. El equipo se instaló en una cámara frigorífica para aislarlo acústicamente, ya que produce un ruido de alta frecuencia extremadamente dañino (Ilustración 5-22).



**Ilustración 5-22 Sala de sonicación instalada en cámara frigorífica**

En un proceso de sonicación los principales parámetros a controlar son tres, la **potencia**, la **amplitud de onda** y la **duración**. Así, combinando estos tres parámetros se transfiere más o menos energía al medio sonicado, que en este caso es una disolución de agua y pellets (los cuales contienen CNTs). Estos tres parámetros se pueden modificar desde el mismo generador o desde un ordenador conectado al mismo por medio de un cable Ethernet, como se ha usado en este ensayo. Además, cabe destacar que el propio generador cuenta con un slot para tarjetas de memoria SD donde se registra todos los parámetros de las sonicaciones realizadas.

### **5.2.2 Ensayos realizados**

El principal objetivo de este ensayo de dispersión es determinar los tres parámetros clave de la sonicación: tiempo, potencia y amplitud de onda; además de constatar si la sonicación realmente dispersa considerablemente los nanotubos.

Para ello se ha partido de **dos relaciones agua-CNTs** distintas: del **1% de MWCNTs** respecto al peso del cemento y del **2% de MWCNTs**. La elección de la primera se debe a que según Perugia (D'Alessandro, Rallini, Ubertini, Materazzi, & Kenny, 2015) el límite de percolación está en torno a dicho valor, además de que es la usada por ellos en sus primeros estudio. La segunda se ha elegido por dos motivos, como determinar la influencia de la cantidad de CNTs (y directamente de pellets) en la dispersión, y porque según las actuales investigaciones este porcentaje ofrece mejor sensibilidad de cara a la posterior monitorización estructural (Ubertini & D'Alessandro, 2016).

## Memoria

En la dosificación se ha partido de las Hojas de Mezclas “Sonicación 1% CNTs” y “Sonicación 2% CNTs” que se pueden consultar en el Anexo A. A continuación se prepararon dos disoluciones:

- **Disolución 1% CNTs:** 150 g de agua y 7.4 g de pellets.
- **Disolución 2% CNTs:** 150 g de agua y 14.8 g de pellets.



Ilustración 5-23 Disolución 1% CNTs

De estas dos disoluciones se obtuvieron ocho muestras, las cuales se enumeran a continuación y se expone los principales parámetros de ensayo.

### **MUESTRA 1:**

**CNTs:** 1%  
**Pot.:** 30% (300 W)  
**Amplitud:** 100 % (\*)  
**Tmáx:** 50 °C **Tlow:** 10 °C  
**Tiempo:** 15 min.

### **MUESTRA 2:**

**CNTs:** 1%  
**Pot.:** 30% (300 W)  
**Amplitud:** 100 %  
**Tmáx:** 50 °C **Tlow:** 10 °C  
**Tiempo:** 30 min. (15+15)

**Memoria**

(\*) A la Muestra 1 se añadió otros 15 minutos de sonicación con los mismos parámetros y se tomó esta Muestra 2.

**MUESTRA 3:**

**CNTs:** 1%

**Pot.:** 80% (800 W)

**Amplitud:** 100 %

**Tmáx:** 80 °C **Tlow:** 5 °C

**Tiempo:** 15 min. (15+15+15)

(\*) Una vez tomada la Muestra 2, se sometió a una sonicación con los parámetros de arriba durante 15 minutos. Por tanto, estuvo sometida a 30 minutos con baja potencia y posteriormente a 15 minutos con alta potencia.

**MUESTRA 4:**

**CNTs:** 1%

(\*) En un tubo de ensayo se añadió 32.2 g de agua y 1.6 g de pellets. Se agitó con la mano y se extrajo una muestra. Casi todos los pellets se quedaron en el fondo.

**MUESTRA 5:**

**CNTs:** 2%

(\*) Una vez preparada la mezcla para el 2% CNTs en el vaso de precipitado se removió con una cuchara y se extrajo la Muestra 5.

**MUESTRA 6:**

**CNTs:** 2%

**Pot.:** 30% (300 W)

**Amplitud:** 100 %

**Tmáx:** 50 °C **Tlow:** 10 °C

**Tiempo:** 15 min.

(\*) Se nota mucho más viscosa al tomarla con la pipeta. Puede ser debido a que dejamos esta mezcla todo un día en reposo antes de sonicar.

**MUESTRA 7:**

**CNTs:** 2%

**Pot.:** 30% (300 W)

**Memoria**

**Amplitud:** 100 %

**Tmáx:** 50 °C **Tlow:** 10 °C

**Tiempo:** 30 min. (15+15)

(\*) Sigue notándose mucho más espesa. Para la Muestra 2 se añadió otros 15 minutos de sonicación con los mismos parámetros.

**MUESTRA 8:**

**CNTs:** 2%

**Pot.:** 80% (800 W)

**Amplitud:** 100 %

**Tmáx:** 80 °C **Tlow:** 5 °C

**Tiempo:** 15 min. (15+15+15)

(\*) Una vez tomada la Muestra 7, se sometió a una sonicación con los parámetros de arriba durante 15 minutos. Por tanto, estuvo sometida a 30 minutos con baja potencia y posteriormente a 15 minutos con alta potencia.



**Ilustración 5-24 Muestras del ensayo de dispersión**

Para la sonicación se procedió de la forma que sigue. A cada disolución se sometió a una sonicación de duración total 45 minutos dividida en tres periodos de 15 minutos cada uno. Así, en el caso de de la disolución del 1% de CNTs transcurridos los primeros 15 minutos se extrajo la 'Muestra 1', a los siguiente 15 minutos la 'Muestra 2' y al final la 'Muestra 3', estando los parámetros de cada periodo arriba reflejados. Ídem en el caso del 2% de CNTs con las muestras 6, 7 y 8.

Además, se decidió estudiar la influencia de la sonicación mediante dos muestras con mezclado manual. Estas son la 'Muestra 4' que se mezcló agitando un tubo de ensayo con disolución del 1% y la 'Muestra 5', que se tomó



### Memoria

después de remover con una cucharilla la disolución del 2%. Obviamente, ambas muestras no fueron sometidas a ninguna sonicación previa.

Durante el proceso de sonicación es necesario refrigerar el medio sonificado debido a las altas temperaturas que se alcanzan. En la sonicación llevada a cabo se refrigeró usando hielo y agua fría (Ilustración 5-25). Además, durante los dos primeros periodos de cada sonicación se estableció una temperatura máxima de 50 °C, por lo que se interrumpió en varias ocasiones al alcanzar dicha temperatura. Para el tercer periodo el máximo seleccionado fue de 80 °C, evitando así que se interrumpiera la sonicación.

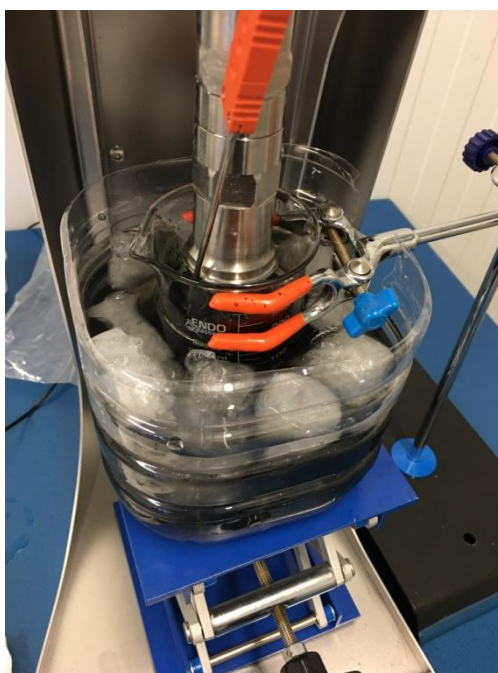


Ilustración 5-25 Refrigeración con hielo durante la sonicación

En la Ilustración 5-26 se ha representado la temperatura a lo largo de los 45 minutos de sonicación para cada disolución. En ella, se puede apreciar claramente los tres intervalos de 15 minutos. Los saltos de 50 °C a 40°C de los dos primeros periodos se deben al límite de temperatura prefijado en la sonicación, el cual provoca que la sonicación se interrumpa hasta que dicha temperatura baje 10 °C. En el tercer periodo, al ser este límite muy superior con la idea de que no se interrumpa la sonicación no hay ese tipo de saltos. La conclusión que se extrae observando la evolución de la temperatura respecto al tiempo para cada disolución es que **a mayor cantidad de nanotubos, mayor será la temperatura.**

También se puede observar la evolución de la potencia transmitida a lo largo del tiempo en la Ilustración 5-27. Los tres periodos de sonicación vuelven a quedar perfectamente definidos en los tres puntos donde la potencia transmitida cruza el eje de abscisas. También se aprecia varias bajadas de

**Memoria**

potencia bruscas, debido a que la sonicación se ha parado al alcanzar el límite de temperatura, cosa que se confirma al no existir esos picos descendentes en el tercer periodo. Los parámetros de sonicación en cada periodo eran idénticos para ambas disoluciones, como se puede ver en la Ilustración 5-27 al ser la potencia transmitida prácticamente igual para ambas disoluciones.

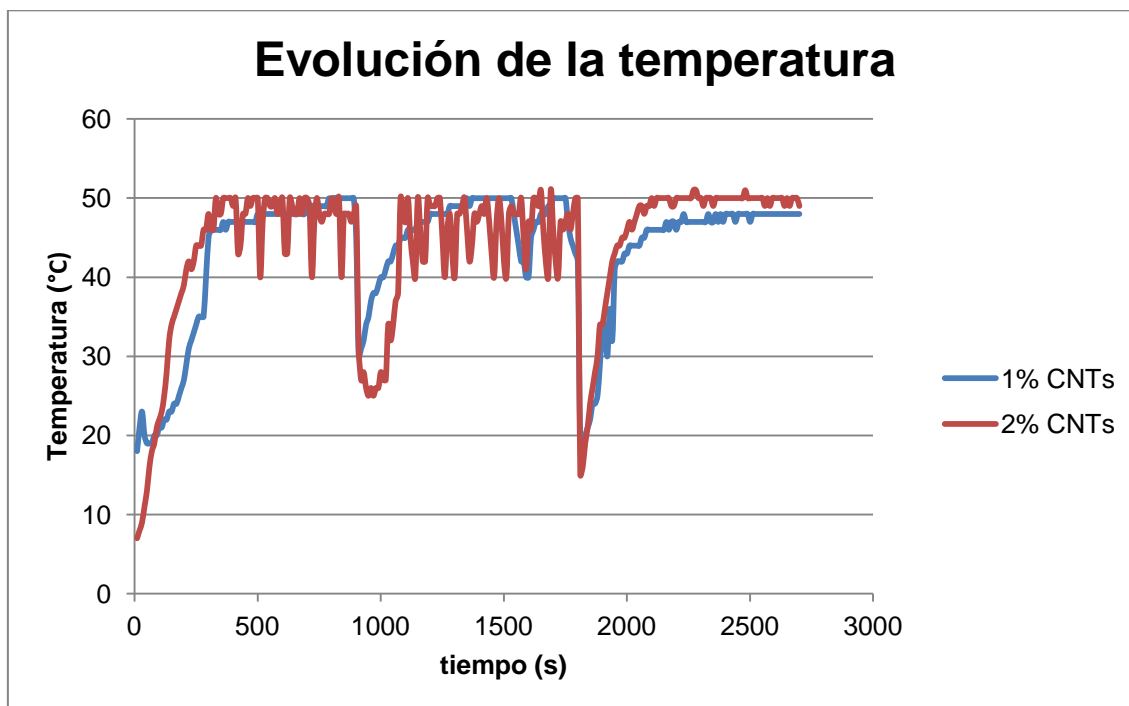


Ilustración 5-26 Evolución de la temperatura

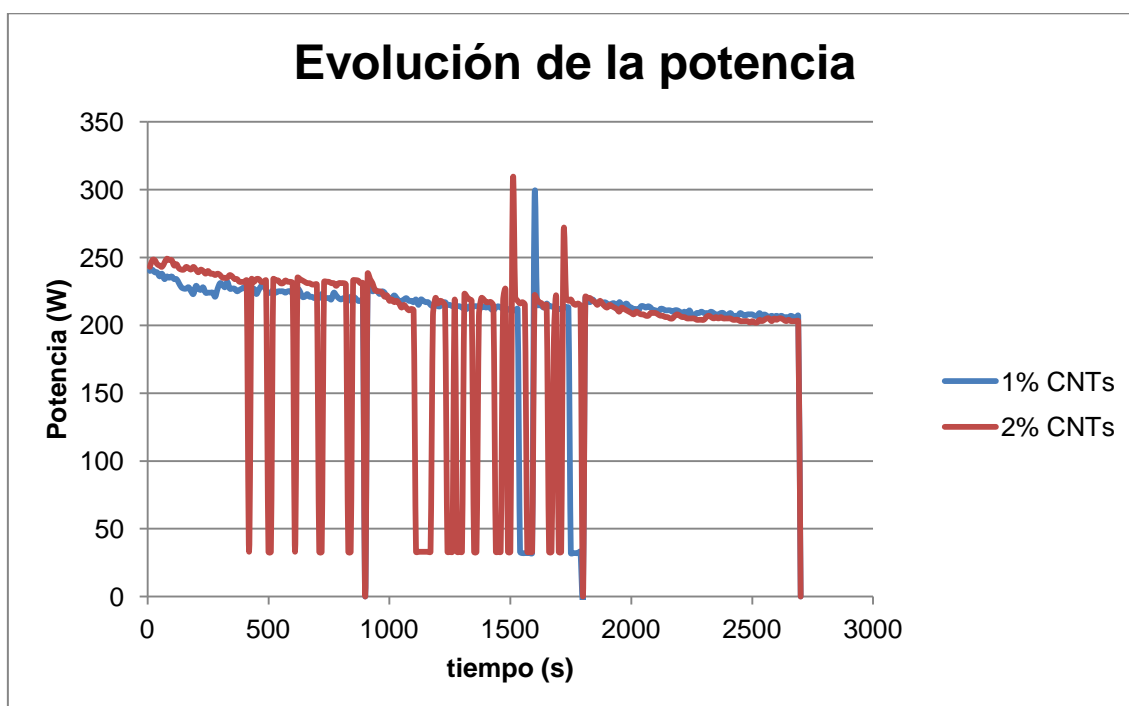


Ilustración 5-27 Evolución de la potencia



### Memoria

Por último, señalar que la energía transmitida a la disolución del 1%, de acuerdo a la Tabla 5-1, fue siempre mayor, posiblemente debido al menor contenido de CNTs, y por tanto, menor calentamiento, por lo que se permite que la potencia aumente. Por lo tanto, podemos decir, a priori, que **a igualdad de parámetros seleccionados en la sonicación, cuanto mayor sea la cantidad de nanotubos, menor será la energía transferida.**

	1 % CNTs	2 % CNTs
<b>Periodo 1</b>	129620 J	126780 J
<b>Periodo 2</b>	105550 J	83036 J
<b>Periodo 3</b>	116610 J	111030 J
<b>Total</b>	351780 J	320846 J

Tabla 5-1 Energía transmitida durante la sonicación

Las dos hipótesis a las que se ha llegado en este apartado serán validadas a lo largo del presente TFG en sucesivas sonicaciones realizadas.

## 5.2.3 Conclusiones

## 5.3 Amasado

### 5.3.1 Materiales empleados

Los sensores fabricados son de pasta de cemento, lo que quiere decir que están formados por cemento y agua. Además, se le ha añadido un aditivo, en concreto un superplastificante, y como no, los nanotubos de carbono que son la base del presente TFG. A continuación se señala las características más relevantes de cada material:

**a) Cemento.** El cemento usado un **CEM I 42.5 R-SR** suministrado por FYM Italcementi Group perteneciente a su gama *i.pro ULTRA*. Es un “*cemento portland, de alta resistencia química a los sulfatos, resistencias mecánicas iniciales y finales y con endurecimiento rápido*” (FYM Italcementi Group). Para más información se puede consultar la ficha técnica del producto en el Anexo F.

## Memoria



Ilustración 5-28 Saco de cemento CEM I 42.5 R/SR

**b) Agua.** El agua empleada es **agua desmineralizada**.

**c) Superplastificante.** El superplastificante que se ha añadido es un **BASF MasterEase 3850**, que es un “aditivo superplastificante/reductor de agua de alta actividad para la producción de hormigones de baja viscosidad y reología mejorada con un buen mantenimiento de consistencia” (BASF Construction Chemicals España, S.L., 2016). Para más información se puede consultar la ficha técnica del producto en el Anexo F. El empleo de este aditivo se debe a que una vez añadida la disolución de agua más CNTs al cemento la trabajabilidad debido a los nanotubos es muy mala, así pues, para mejorar dicha trabajabilidad se ha optado por añadir un superplastificante, lo que permite huir de altas relaciones agua/cemento que posteriormente podrían dar problemas tales como las coqueras o que el sensor de resquebraje.

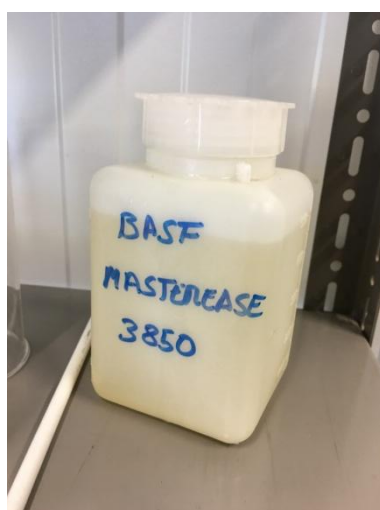


Ilustración 5-29 Superplastificante BASF MasterEase 3850

**d) Nanotubos.** Los nanotubos se han añadido en forma de pellets. Los pellets usados, de la firma ARKEMA, son los **Graphistrength® CW2-45**, los cuales

## Memoria

contienen un 45% en peso de MWCNTs dispersados en carboximetilcelulosa (CMC) o más conocida como carmelosa, que representa el 55% de peso restante. El CMC es un derivado de la celulosa, compuesto por grupos carboximetil, enlazados a algunos grupos hidroxilo, presentes en polímeros de la glucopiranososa. . Para más información se puede consultar la ficha técnica del producto en el Anexo F.



Ilustración 5-30 Pellets

### 5.3.2 Proceso de amasado

Se han realizado tres amasadas, diferenciándose cada una de ellas por su contenido de nanotubos:

- .- **Amasada nº 2**, con 1 % de CNTs e identificador 1.00\_CNTs\_2.
- .- **Amasada nº 3**, con 1.5 % de CNTs e identificador 1.50\_CNTs\_3.
- .- **Amasada nº4**, con 0.5 % de CNTs e identificador 0.50\_CNTs\_4.

Así, la dosificación empleada por metro cúbico de mezcla se recoge en la Tabla 5-2. Con cada amasada se obtuvieron 11 sensores, que considerando unas pérdidas del 15 %, se empleó las cantidades de la Tabla 5-3.

Dosificación por m <sup>3</sup> de mezcla	
<b>Cemento</b>	1277 kg
<b>Agua</b>	45%
<b>Superplastificante</b>	1.5 %
<b>MWCNTs</b>	0.5/1.0/ 1.5 %

Tabla 5-2 Dosificación por m<sup>3</sup> de mezcla

**Memoria**

Cantidades usadas		
	Masa (g)	%
<b>Cemento</b>	2143	-
<b>Agua</b>	964	45
<b>Superplastificante</b>	33	1.5
<b>Pellets</b>	23.8/47.6/71.4	1.1/2.2/3.3
<b>(MWCNTs)</b>	10.7/21.4/32.1	0.5/1.0/1.5

Tabla 5-3 Cantidades usadas en las amasadas

Para más información sobre cada amasada consultar en el Anexo A las Hoja de Mezcla correspondiente.

La cantidad de superplastificante se determinó totalmente de manera empírica en la primera amasada. Se fue añadiendo lentamente hasta que se obtuvo una trabajabilidad adecuada; y posteriormente se usó esa misma cantidad para las otras dos amasadas restantes.



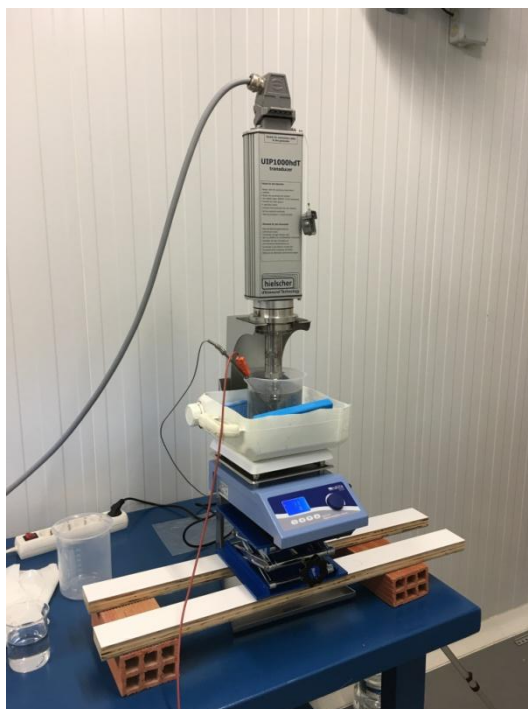
Ilustración 5-31 Materiales preparados para la sonicación

Una vez con las cantidades preparadas (Ilustración 5-31) se procedió a la sonicación. Los parámetros empleados para las tres amasadas fueron:

- Potencia: 30 %
- Amplitud: 84 %
- Tiempo: 30 minutos

Para ayudar a la dispersión, además del sonicador se usó un agitador magnético, a una velocidad de 1000 rpm. Así pues, el mezclado consistió en una sonicación a la vez que un mezclado mecánico, tal y como se ve en la Ilustración 5-32. El sonotrodo se colocó descentrado respecto al recipiente, quedando en el centro la “pulga” del agitador magnético (Ilustración 5-33).

**Memoria**



**Ilustración 5-32** Sonicación más agitador magnético



**Ilustración 5-33** Colocación del sonotrodo

En la Ilustración 2-2 se refleja la temperatura de las disoluciones a lo largo de la sonicación, mientras que en la Ilustración 5-35 se visualiza la potencia transferida en cada instante.

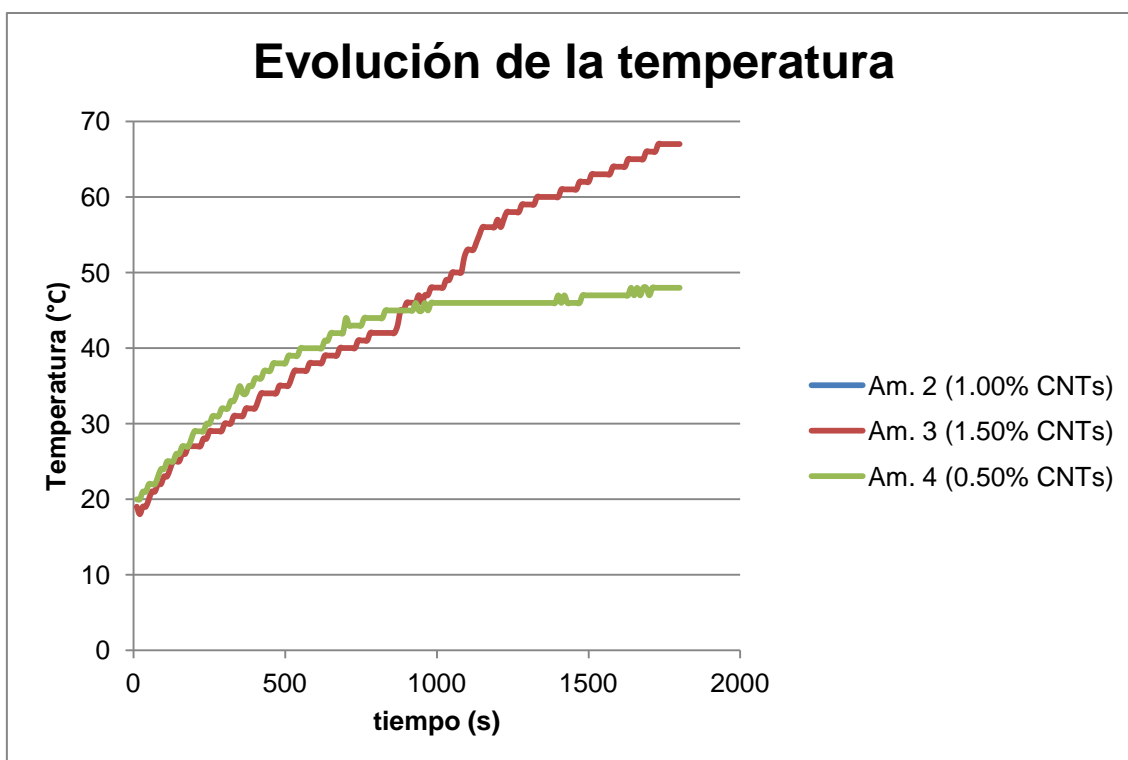
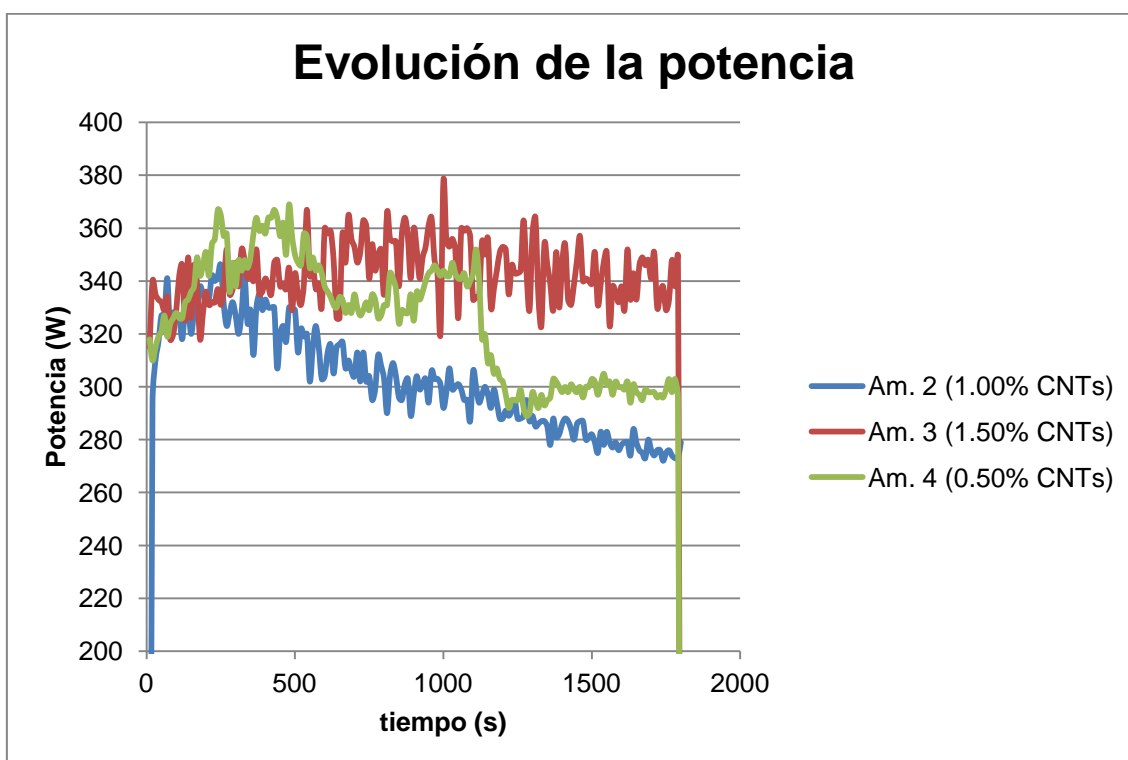
Ilustración 5-34 Evolución de la temperatura durante la sonicación para las tres amasadas<sup>7</sup>

Ilustración 5-35 Evolución de la potencia transferida durante la sonicación para las tres amasadas

La energía transferida es la indicada en la Tabla 5-4.

<sup>7</sup> Debido a un problema informático no fue posible recuperar los registros de temperatura de la amasada nº 2.



**Memoria**

Amasada	Energía transferida (J)
nº 2 (1.00 % CNTs)	392820
nº 3 (1.50 % CNTs)	465950
nº 4 (0.50 % CNTs)	435370

Tabla 5-4 Energía transferida durante la sonicación

A la hora de mezclar la disolución de agua y pellets con el cemento y el superplastificante se procedió de tres formas distintas:

- **Amasada 2.** La disolución caliente se añadió directamente al cemento, mezclando con la amasadora automática. El superplastificante se añadió en los primeros minutos mientras se mezclaba.
- **Amasada 3.** A la disolución aún caliente se le añadió el superplastificante. Entonces aumentó su viscosidad considerablemente, tomando una consistencia parecida a la del puré. Posteriormente, antes de comenzar el amasado con el cemento se dejó enfriar hasta temperatura ambiente (unos 20 °C).
- **Amasada 4.** La disolución caliente se enfrió hasta temperatura ambiente. A continuación se amasó con el cemento añadiendo al inicio todo el superplastificante.



Ilustración 5-36 Adición de la disolución de la amasada nº 2 al cemento

Teniendo en cuenta la trabajabilidad resultante de cada amasada, se evidencia que la forma más efectiva es la tercera: **dejar enfriar la disolución de agua y nanotubos hasta temperatura ambiente, para proceder al amasado con el cemento, añadiendo el superplastificante al inicio del amasado.**



### Memoria

A continuación se amasó cada tongada en una amasadora automática (Ilustración 5-37) hasta que la mezcla era lo suficientemente homogénea y presentaba una trabajabilidad adecuada. Añadir que, según el suministrador del superplastificante, para que este actúe adecuadamente se debe mezclar en exceso.



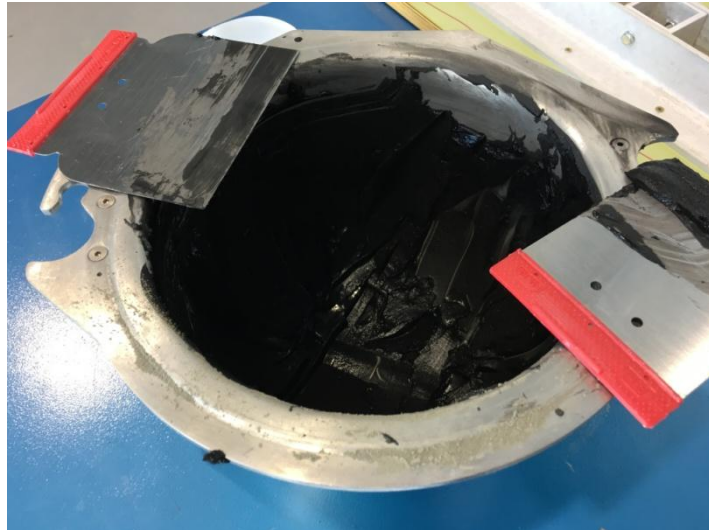
Ilustración 5-37 Amasadora automática



Ilustración 5-38 Amasada durante el mezclado

#### **5.4 Proceso de colada**

Una vez que la mezcla presenta una trabajabilidad adecuada y es lo suficientemente homogénea se procede al proceso de colada en el molde (Ilustración 5-39). Con la ayuda de unas espátulas de carroceros se llena cada molde a la vez que se pica para eliminar posibles burbujas de aire (Ilustración 5-40). Previamente a la colada se ha aplicado un desmoldeante.



**Ilustración 5-39 Mezcla lista para llenar los moldes**



**Ilustración 5-40 Moldes durante el proceso de colada**

Todo este proceso se efectuó sobre una mesa vibrante constituida por un banco de trabajo metálico sobre el que se colocó un compresor de aire comprimido sin los silentblock que aíslan de las vibraciones producidas por dicho compresor (Ilustración 5-41).

## Memoria



Ilustración 5-41 Mesa vibrante

Además, se vibraron los moldes manualmente con la ayuda de mazos de goma tras introducir los electrodos (Ilustración 5-42). Finalmente, se han dejado los tres moldes, con un total de 33 sensores, en una habitación cerrada y con condiciones controladas, para que fragüe y endurezca la pasta de cemento (Ilustración 5-43).



Ilustración 5-42 Detalle de los electrodos introducidos



## Memoria



Ilustración 5-43 Fraguado y endurecimiento de los sensores

### 5.5 Desmoldeo

El desmoldeo de las amasadas número 2, 3 y 4 se realizó once días después de la colada. En general todos los sensores presentan numerosas grietas y coqueras. Se retiró el ala extraíble y se aplicaron unos pequeños golpecitos para que los sensores se despegaran. A la par que se iban retirando los sensores se fueron extrayendo los separadores.

De las tres amasadas, la número 4 es la que mejor aspecto presenta, ya que la mayoría de los sensores guardan la geometría cúbica inicial, no están seccionados en dos, no hay grandes desprendimientos ni coqueras. Esto es debido a que fue la amasado con mejor trabajabilidad, y con las condiciones de preparación más óptimas: el agua con los CNTs se añadió a temperatura ambiente y el plastificante se aplicó a la amasadora.

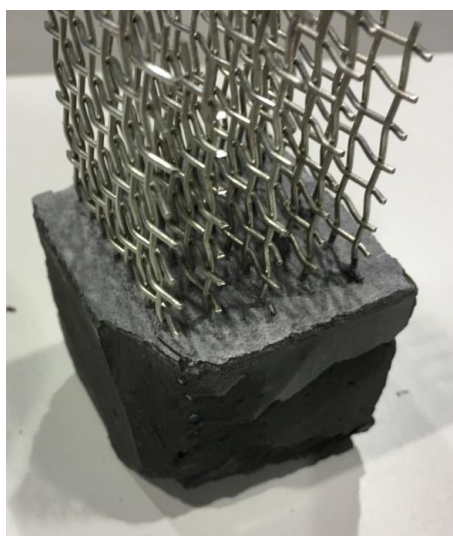


Ilustración 5-44 Sensor 4.4

### Memoria

La amasada número 2 es la peor con diferencia, ya que casi todos los sensores se encontraban desgranados, partidos en dos o con grandes coqueras. Dado que a esta amasada el plastificante también se añadió en la amasadora, podemos decir que el causante de este problema fue que el agua en el momento de la mezcla se encontraba caliente (unos 40 °C). Se descarta que el problema fuera la concentración de nanotubos, ya que en este era del 1.0 %, y en la amasada número 3, que era del 1.5 %, su aspecto era intermedio.

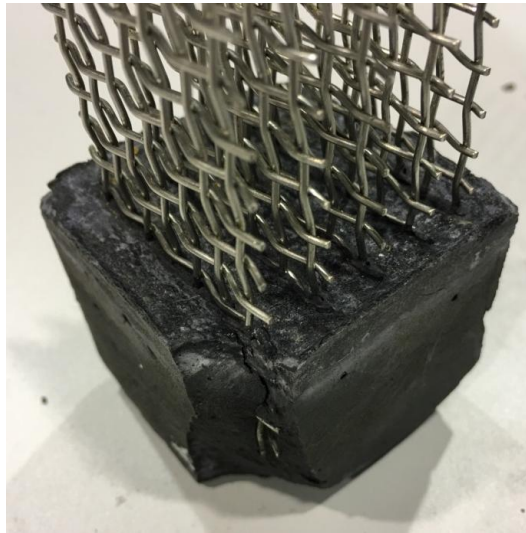


Ilustración 5-45 Sensor 2.11

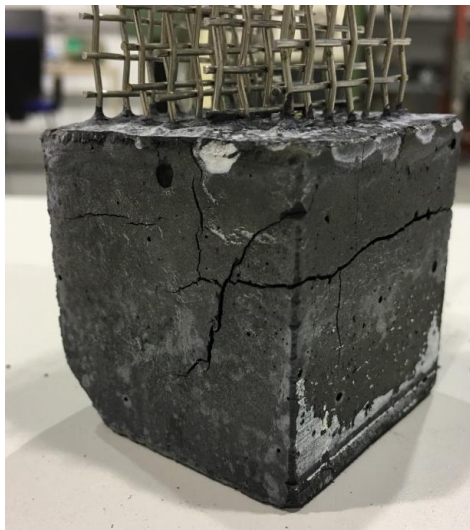


Ilustración 5-46 Sensor 3.5

Cabe destacar también que todos sensores presentaban una retracción notable, además de tener una fina capa blanquecina (Ilustración 5-47) a modo de piel que los envolvía. El origen de esta capa se presupone que es debido al desmoldeante aplicado, el cual era también de color blanco. Además, el desmoldeante no fue todo lo eficaz que debiera, ya que todos los sensores

## Memoria

presentaban una dificultad notable para su extracción, siendo necesario, como ya se ha indicado, aplicarle unos golpecitos.

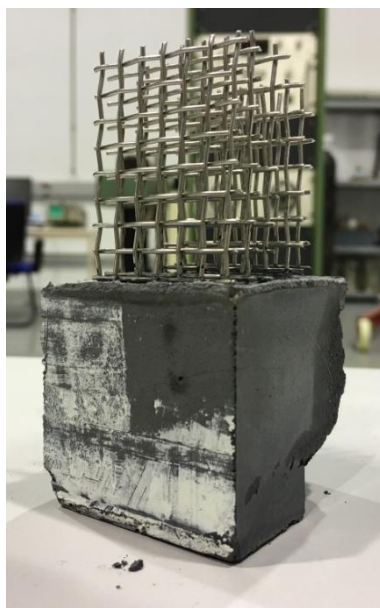


Ilustración 5-47 Capa blanquecina en el sensor 4.5

A cada sensor se le ha asignado un identificador, de la forma XX.YY, donde XX representa el número de amasada correspondiente y YY indica el número de sensor dentro de esa amasada. Esta identificación puede verse en la parte inferior del sensor (Ilustración 5-48).



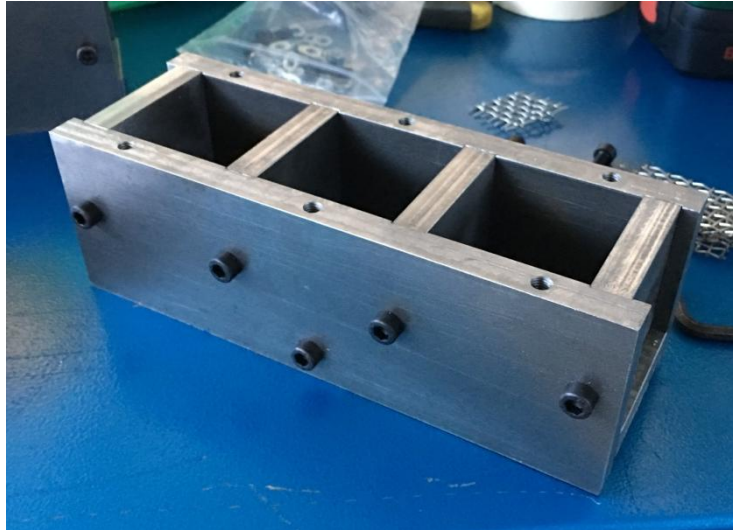
Ilustración 5-48 Identificador del sensor 4.7

### 5.6 Mejoras es las futuras amasadas

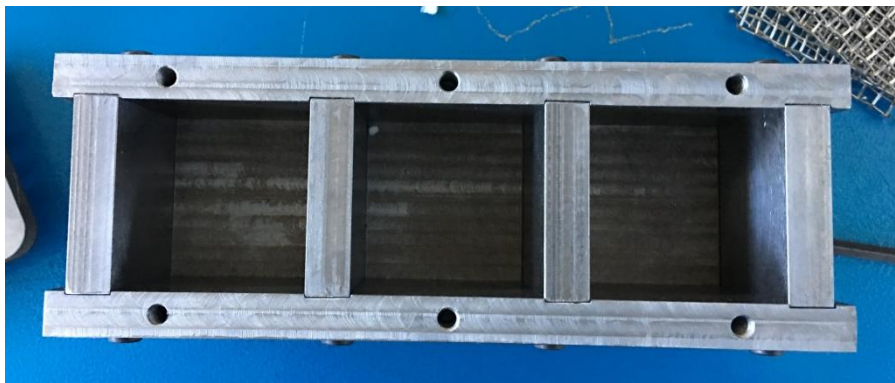
Dado el fracaso en las tres amasadas realizadas, las cuales son el cimientto de este TFG, se han analizado las los posibles errores con el objetivo de poder obtener unos sensores mucho más homogéneos, menos frágiles, y como no, en mejores condiciones.

**Memoria**

En primer lugar se encargó a una empresa externa que mecanizara unos moldes metálicos similares a los proyectados inicialmente (apartado 5.1.1), ya una superficie metálica correctamente mecanizada proporciona un mejor desmoldeo y menos fricción durante el mismo. En la Ilustración 5-49, Ilustración 5-50 y Ilustración 5-51 puede verse dichos moldes.



**Ilustración 5-49 Molde metálico (vista 1)**



**Ilustración 5-50 Molde metálico (Vista 2)**



## Memoria



Ilustración 5-51 Molde metálico (Vista 3)

También se puso el foco de atención en la mencionada capa blanquecina, llegando a la conclusión de que parece ser restos del desmoldeante aplicado. Se decidió usar como desmoldeante aceite de girasol.

Por último, respecto al superplastificante, se decidió bajar la dosis y aumentar el tiempo de amasado conforme a las instrucciones del representante del suministrador, ya que un exceso de superplastificante puede originar varios de los defectos anteriormente comentados.

Con estos cambios se realizaron tres amasadas, cada una de ellas compuesta por tres sensores:

- .- **Amasada nº 7**, con 0.25 % de CNTs e identificador 0.25\_CNTs\_7.
- .- **Amasada nº 8**, con 0.75 % de CNTs e identificador 0.75\_CNTs\_8.
- .- **Amasada nº 9**, con 1.00 % de CNTs e identificador 1.00\_CNTs\_AguaGrifo\_9.

La amasada nº 9 se realizó con agua potable corriente, con la intención de estudiar el efecto de la misma.

Así, la dosificación empleada por metro cúbico de mezcla se recoge en la Tabla 5-5. Con cada amasada se obtuvieron 3 sensores, que considerando unas pérdidas del 50 %, se empleó las cantidades de la Tabla 5-6.

Dosificación por m <sup>3</sup> de mezcla	
<b>Cemento</b>	1277 kg
<b>Agua</b>	50/50/71 %
<b>Superplastificante</b>	0.7 %
<b>MWCNTs</b>	0.25/0.75/ 1.00 %

Tabla 5-5 Dosificación por m<sup>3</sup> de mezcla

**Memoria**

<b>Cantidades usadas</b>		
	<b>Masa (g)</b>	<b>%</b>
<b>Cemento</b>	762	-
<b>Agua</b>	381/381/541	50/50/71
<b>Superplastificante</b>	5	0.7
<b>Pellets</b>	4.2/12.7/17.0	0.6/1.7/2.2
<b>(MWCNTs)</b>	1.9/5.7/7.7	0.25/0.75/1.0

Tabla 5-6 Cantidades usadas en las amasadas

Para más información sobre cada amasada consultar en el Anexo A las Hoja de Mezcla correspondiente.

Los parámetros de la sonicación fueron 30 minutos al 30 % de potencia, con un límite de temperatura de 80 °C, de forma que no se interrumpiera la sonicación.

En los tres casos, acorde a lo expuesto en 5.3.2, se esperó a que la disolución se enfriase hasta alcanzar la temperatura ambiente y el superplastificante se añadió en los primeros instantes del amasado. La amasadora automática se programó a 50 rpm durante un tiempo de 9 minutos.

La amasada nº 7 presentaba una trabajabilidad demasiado fluida, pues parecía sopa. La nº 8, debido a la mayor cantidad de nanotubos, ya tiene una trabajabilidad bastante menor, pues era más espesa y presentaba ciertas dificultades para el correcto llenado de los moldes. Se puede situar la trabajabilidad de esta amasada como la límite.

La amasada nº 9, realizada con agua del grifo, presentó un comportamiento muy interesante. Inicialmente se realizó con una relación A/C del 50 %, pero con dicha relación resultó totalmente imposible amasar. Por lo cual, se fue añadiendo agua hasta llegar al 70 %. Con esta relación la trabajabilidad obtenida es la ideal.



Ilustración 5-52 Amasadas en moldes metálicos

### **Memoria**

Pasada una semana se procedió al desmoldado de los sensores, obteniendo unos resultados fabulosos, aún más si se comparan con las amasadas anteriores.

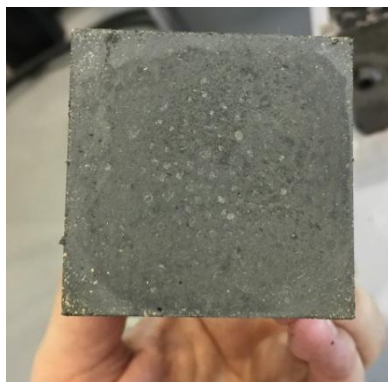
La amasada del 0.25 % de CNTs (amasada nº 7) se desmoldeó muy fácilmente, ni tan siquiera resultó necesario abrir los moldes (Ilustración 5-53). Los sensores no presentan ningún tipo de defecto, siendo todos homogéneos.



**Ilustración 5-53 Desmoldado amasada nº 7 sin abrir el molde**



**Ilustración 5-54 Sensor 7.1**



**Ilustración 5-55 Sensor 7.1 aún sin identificar**

### Memoria

La amasada con agua del grifo (amasada nº 9) presenta las mismas características que la anterior. Tan solo un sensor presenta fallo, ya que está partido en dos por unas malla, debido a que la pasta de cemento no ha logrado atravesarla correctamente, y otro una grieta muy superficial sin apenas profundidad (Ilustración 5-56).

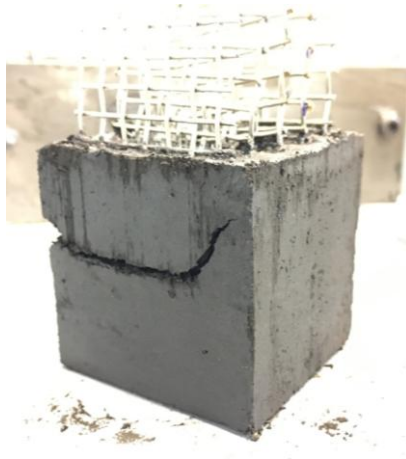


Ilustración 5-56 Sensor amasado nº 9 con grieta superficial

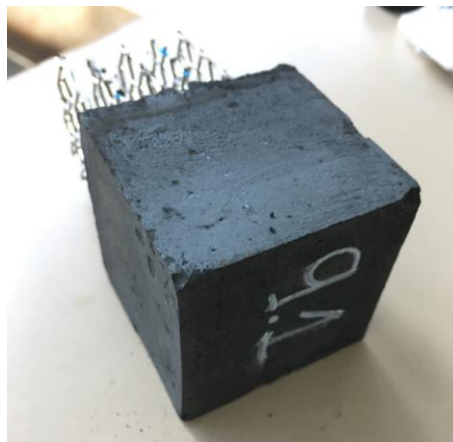


Ilustración 5-57 Sensor 9.1

En cambio, los sensores de la amasada nº 8 si que presentaban un número considerable de grietas (en todo caso menor a las de las amasadas nº 2, nº 3 y nº 4), además de de una notable retracción en la zona de los electrodos. En la Ilustración 5-58 y en la Ilustración 5-59 puede observarse dichos defectos.

**Memoria**



**Ilustración 5-58 Sensor 8.2**



**Ilustración 5-59 Retracción en la zona de los electrodos en el sensor 8.3**

Las conclusiones de este apartado 5.6 son las siguientes:

- El uso de moldes metálicos correctamente mecanizados es fundamental para facilitar el desmoldado.
- Como desmoldenante resulta conveniente utilizar aceite de girasol en lugar de un producto específico, pues así se consigue eliminar la capa blanquecina que queda en el sensor y también resulta más fácil desmoldar.
- A menor cantidad de CNTs mejor trabajabilidad, y se obtienen sensores con menos defectos.
- A igualdad de cantidad de CNTs el uso de agua potable corriente palia el efecto de los CNTs, es decir, se obtienen sensores con menos defectos y la trabajabilidad en mayor. Sin embargo, la relación A/C debe



**Memoria**

incrementarse notablemente respecto a la empleada con agua desmineralizada.



## 6 CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE LOS SENSORES

### 6.1 Ensayo estático sin carga

La caracterización eléctrica de los sensores mediante un ensayo estático lo que pretende es medir la resistencia eléctrica del sensor a tiempo infinito, siendo especialmente importante esto último, ya que los sensores experimentan una polarización eléctrica, lo cual provoca que la resistencia eléctrica varíe a lo largo del tiempo.

La polarización consiste básicamente en una orientación y alineación de las partículas del medio en cuestión según su carga eléctrica al hacer pasar una corriente eléctrica por él, de forma que una parte queda cargado positivamente, y la otra negativamente, es decir, “aparece un polo positivo y otro negativo”.

Esta diferencia potencial añadida, que va aumentando con el tiempo hasta que se estabiliza en un tiempo infinito, provoca una variación en la corriente eléctrica, y por tanto, según la ley de Ohm, en la resistencia.

En la Ilustración 6-1 puede verse el efecto de la polarización, En el eje de abscisa se ha representado el tiempo  $t$  en segundos, y en el de ordenadas la resistencia en ohmios. Es evidente que la resistencia eléctrica se estabiliza en torno a los 1000 segundos, por lo tanto, la resistencia en tiempo infinito se puede suponer igual a la resistencia transcurridos 1000 segundos.

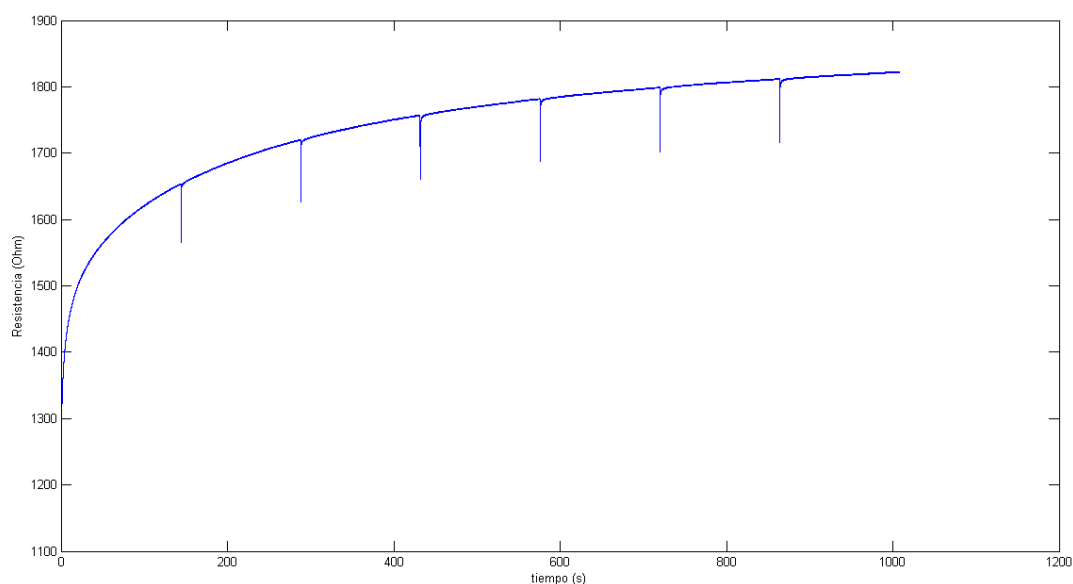


Ilustración 6-1 Evolución de la resistencia eléctrica del sensor 2.11

### **6.1.1 Metodología**

Para medir la resistencia eléctrica se suministra a cada sensor una diferencia de potencial conocida (10 V) y se mide directamente la intensidad que circula por él. Aplicando la ley de Ohm (Ecuación 6-1) se puede conocer la resistencia.

$$V = I \cdot R$$

#### **Ecuación 6-1 Ley de Ohm**

Para este ensayo, dado que el sensor se encuentra en reposo, se ha usado una conexión por medio de cocodrilos, y tipo 1, pues lo que se desea conocer es la resistencia eléctrica entre los extremos del sensor.

El principal problema que se plantea es el ya citado de la polarización, ya que esperar más de 1000 segundos, casi 17 minutos por medida, y teniendo en cuenta que para este ensayo se ha seleccionado 10 sensores distintos, y que debe repetirse periódicamente, se llega a la conclusión de que el tiempo requerido para ello es demasiado alto. Resulta necesario encontrar un método para poder obtener un valor aproximado de la resistencia en  $t_{1000}$ .

#### **6.1.1.1 Aproximación de la resistencia eléctrica**

En primer lugar se llevó a cabo diversas mediciones completas para determinar la resistencia eléctrica en  $t_{1000}$ . Tras un posterior análisis de los datos se planteó dos aproximaciones:

**.- Aproximación A:** Consiste en suponer que la resistencia transcurridos 100 segundos es el 90 % de la resistencia final.

**.- Aproximación B:** Se obtiene una aproximación de la curva (Ecuación 6-2) tomando puntos hasta los 180 segundos primeros. Conocida la ecuación de la curva basta con introducir como tiempo 1000 segundos para obtener directamente el valor de la resistencia.

$$R(t) = A \cdot \ln(t) + B$$

#### **Ecuación 6-2 Aproximación B**

A las medidas obtenidas se aplicó ambas aproximaciones para comparar la efectividad de cada una de ellas y elegir la más adecuada. En la Tabla 6-1 puede verse los diferentes datos. La columna “medida”, de la forma XX\_YZ, representa el sensor usado (XX), y entre qué electrodos se ha conectado los cocodrilos (electrodo Y y electrodo Z).

**Memoria**

<b>Medida</b>	<b>Valores reales</b>		<b>APROXIMACIÓN A</b>		<b>APROXIMACIÓN B</b>	
	<b>t100</b>	<b>t1000</b>	<b>aprox</b>	<b>error (%)</b>	<b>aprox</b>	<b>error (%)</b>
38_15	2178	2623	2420	8	2599,2	1
38_14	859	883	954	-8	876,9	1
38_13	1845	2093	2050	2	2076,8	1
24_15	1168	1211	1298	-7	1218,9	-1
24_14	891	950	990	-4	909,7	4
24_13	744	798	827	-4	799,2	0
211_15	1628	1823	1808	1	1808,4	1
23_15	1340	1578	1489	6	1431,5	9
38_15	2246	2968	2496	16	2745	8
45_15	1010	1023	1122	-10	1013	1
<b>MEDIA</b>				<b>-0,06</b>		<b>2,44</b>
<b>DESV. STD.</b>				<b>8,1</b>		<b>3,4</b>

Tabla 6-1 Errores de las Aproximaciones A y B

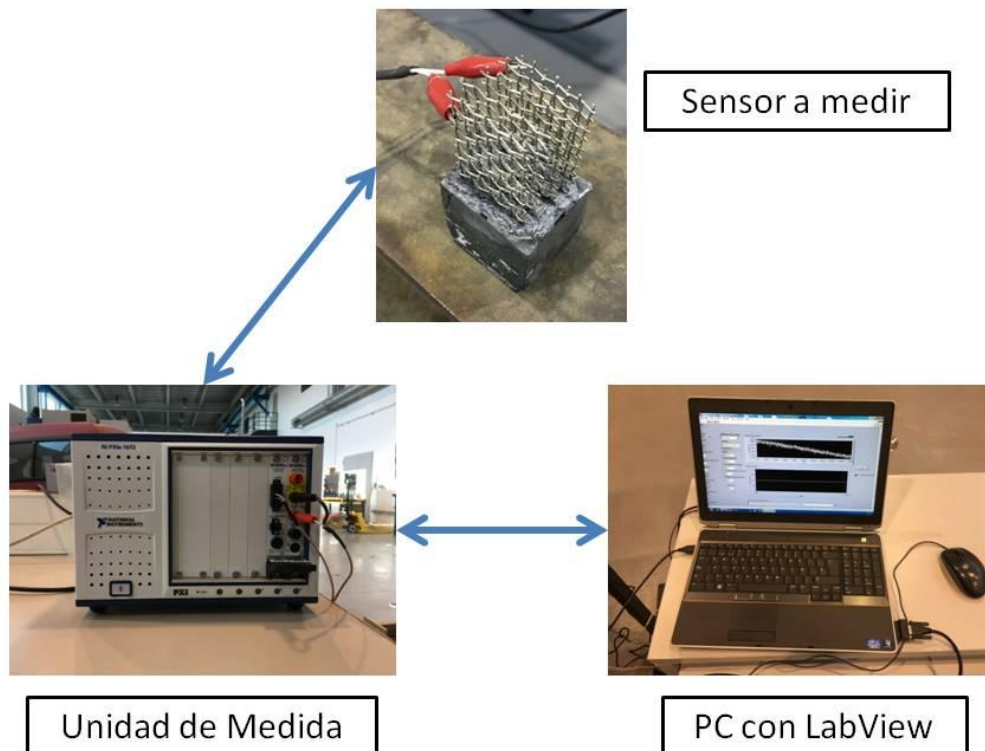
En vista a los resultados de la Tabla 6-1 se ha elegido la aproximación B como la más adecuada, ya que presenta una menor desviación estadística (3.4 % frente a 8.1 %), a pesar de que el error es mucho mayor, pero esto es debido a que en la aproximación A los errores se van equilibrando al tener signos opuestos. Si se calculara la media del error en términos de valor absoluto, tendríamos un error medio para la aproximación A de 6.50 %, mientras que para la B es de solo 2.59 %.

**6.1.2 Cadena de medida**

Para la medida de la resistencia se pueden distinguir tres elementos fundamentales, según el esquema de la Ilustración 6-2. Estos elementos son:

- **Sensor a medir**
- **Portátil DELL Latitude E6520 con LabVIEW Versión 2015 32 bits.**
- **Unidad de Medida.** Esta unidad recibe del PC los parámetros introducidos por el usuario y envía al sensor la diferencia de potencial establecida, que para este ensayo es de 10 V. La misma Unidad de Medida se encarga de medir la intensidad de corriente eléctrica que circula por el sensor y enviar estos datos al PC. Para controlar la Unidad de Medida se utiliza un programa en LabVIEW desarrollado por el equipo de Perugia.

**Memoria**



**Ilustración 6-2 Cadena de medida**

La Unidad de de Medida está compuesta por:

- Un chasis NI PXIe-1073 de National Instruments
- Una unidad de medida de fuente de National Instruments modelo NI PXI-4130
- Un multímetro digital (DMM) PXI de 7 ½ dígitos y digitalizador de 1000V de National Instruments modelo PXI-4071.

Para más información sobre algún equipo de medida consultar el Anexo G. En el Anexo C se encuentra un guía básica para usar el programa de LabVIEW para la medición.

El conexionado de cables a la Unidad de Medida es el mostrado en la Ilustración 6-3. Cabe destacar que todos los equipos de medida tenían las tierras unidas entre sí y estaban conectados al mismo enchufe.

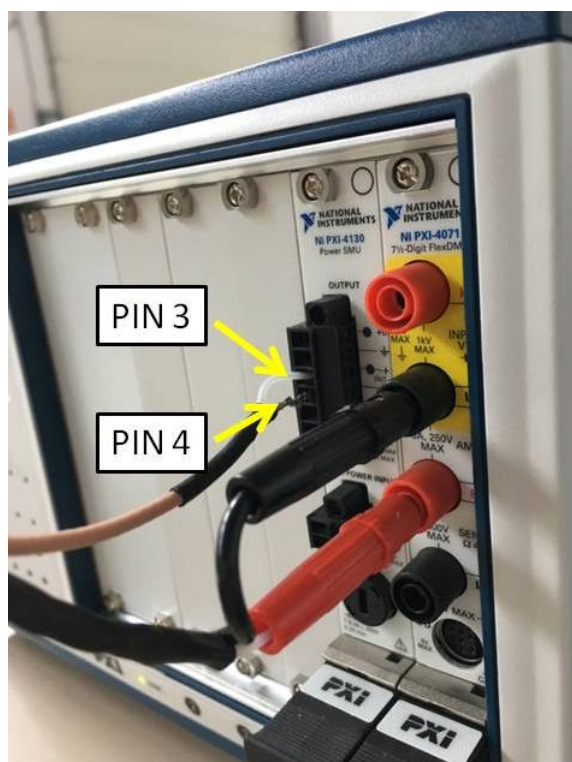


Ilustración 6-3 Conexiones Unidad de Medida

### 6.1.3 Resultados

En la Tabla 6-2 se resume la resistencia eléctrica de cada sensor a tiempo infinito a lo largo del tiempo. En la Ilustración 6-4 se muestran los datos graficados.

La resistencia correspondiente al día 31 fue medida después de someter los sensores a una carga de unos 100 kg, y las correspondiente al día 39 después de tres ciclos de compresión con un máximo de 200 kg.

RESISTENCIA		Días transcurridos dese la amasada								
% CNTs	Sensor	14	17	19	21	22	25	28	31	39
0.5	4.5	504	546	656	-	783	823	908	1013	1374
	4.7	22000	33000	38462	-	61732	244662	73614	200000	-
	4.3	1950	3200	6897	-	61236	86592	83681	378267	214808
	4.4	-	570	654	-	798	832	903	1015	1319
1.0	2.4	-	650	1046	1212	-	1259	1307	2693	10253
	2.11	560	770	1650	1823	1860	1778	2379	3174	2852
	2.3	-	800	1420	1578	1335	1432	1575	1906	2623
1.5	3.5	770	960	1462	-	1744	1768	1878	2098	2526
	3.3	720	860	1634	-	2021	2048	2130	2522	2552
	3.8	680	850	2146	2535	2545	2574	2745	3352	4019

Tabla 6-2 Evolución de la resistencia eléctrica en tiempo infinito desde la amasada

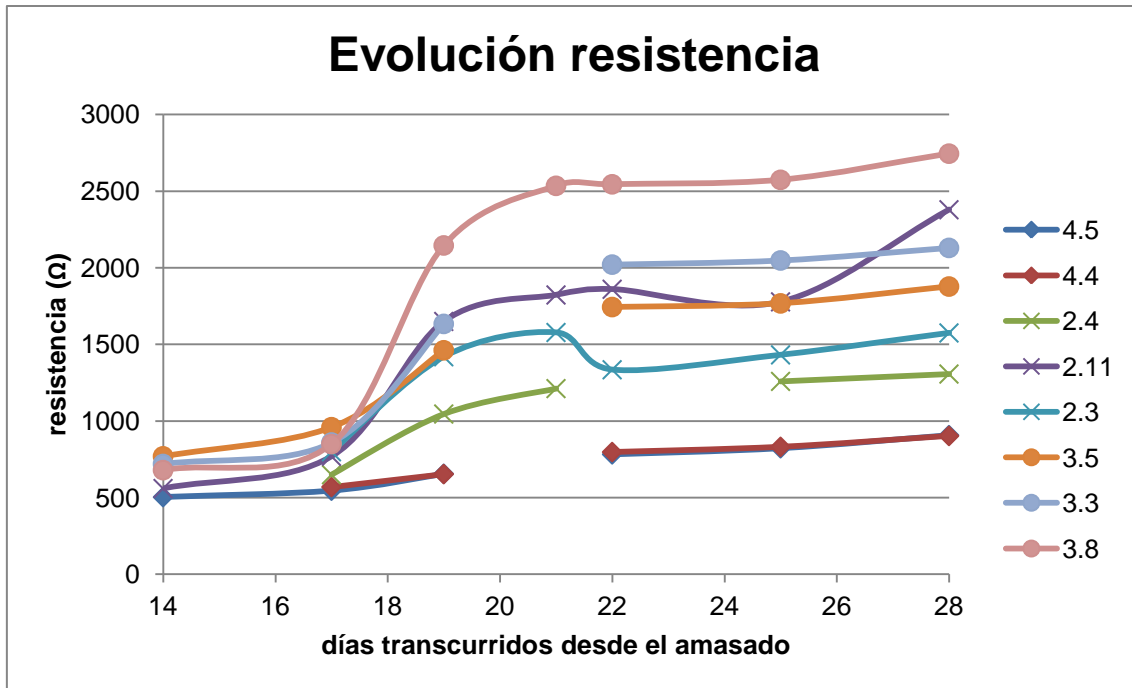


Ilustración 6-4 Evolución resistencia

#### 6.1.4 Análisis de resultados y conclusiones

Comparando la resistencia de los sensores 4.7 y 4.3 con los 4.4 y 4.5 se observa una incoherencia total. La explicación se debe a que los dos primeros sensores presentan una grieta que tiende a seccionarlos en dos por uno de los electrodos (Ilustración 6-5). Debido a esta grieta la resistencia eléctrica aumenta enormemente, desde órdenes de  $1\text{k}\Omega$  hasta los  $70\text{-}80\text{k}\Omega$ . Esta hipótesis se confirma en el apartado 6.1.5 cuando se mide la resistencia entre los electrodos 1 y 4, de forma que no queda la grieta la sección medida, siendo el valor de la resistencia obtenida en esta caso acorde a los demás sensores de du mismo contenido en CNTs.

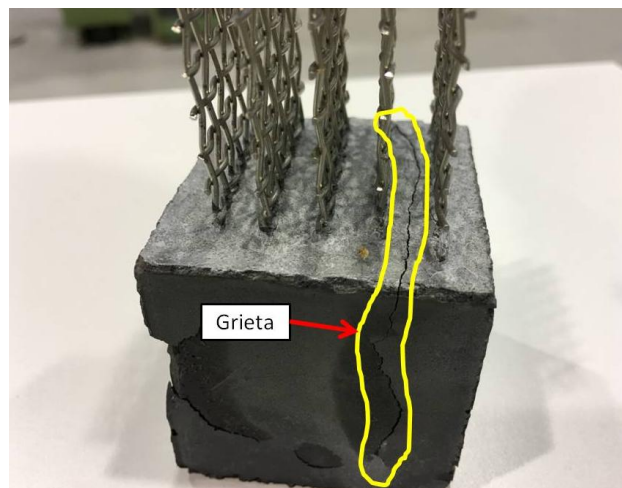


Ilustración 6-5 Grieta en el sensor 4.3



### **Memoria**

Otra conclusión que se extrae es que, a mayor cantidad de CNTs mayor es la resistencia. Pero esta conclusión no tiene una explicación, a priori, fácil, ya que la tendencia debería ser la contraria, puesto que los nanotubos favorecen la conductividad eléctrica. Se plantean dos posibles explicaciones:

- Al ser mayor el contenido de nanotubos también lo es de celulosa, pues ambos van ligados en los pellets, de forma que la celulosa actúa como aislante. Sin embargo, esta explicación presenta un inconveniente, y es que si la celulosa que envuelve los CNTs actúa como aislante, los sensores no conducirían la electricidad, y por ende, no funcionarían.
- Como los parámetros de la sonicación eran idénticos en las tres amasadas se ha transferido aproximadamente la misma cantidad de energía para las tres amasadas. Como la nº 4 tiene menor contenido de pellets, resulta que la energía por unidad de masa de pellets que ha recibido es mayor que las demás, y al recibir más energía ha podido, o bien romper los nanotubos, o romper los envoltorios de celulosa, mejorando en ambos casos la conductividad eléctrica, lo que implica una bajada de la resistencia.

También cabe destacar que después de someter los sensores a carga en la resistencia se produce un incremento notable, no debido a su normal evolución. Una idea inicial es que dicho incremento se deba a nuevas fracturas que cause la carga, o a un comportamiento de histéresis en los sensores.

Por último comentar la tendencia de crecimiento de la resistencia a lo largo del tiempo. En el entorno de la veintena de días la resistencia da un salto considerable para ya luego crecer lenta y linealmente. Se intuye que aún pasados los 28 días esta resistencia seguirá creciendo al mismo ritmo.

#### **6.1.5 Detección de discontinuidades**

La medida de la resistencia eléctrica entre los diferentes electrodos del sensor también puede usarse para detectar discontinuidades como grietas, burbujas o coqueas.

La resistencia medida entre dos electrodos debe ser proporcional a la distancia entre ambos electrodos. Así pues, la resistencia entre los electrodos 1 y 5 será siempre mayor que entre los 1 y 3, por ejemplo. Si se mide la resistencia entre los cuatro electrodos, manteniendo el primer electrodo fijo, y se representan los cuatro valores, deben de estar situados sobre una recta.

A los 19 días desde la amasada se sometió a esta prueba a los sensores 4.3 y 4.7, los cuales presentaban una grieta que claramente tendían a seccionarlos en dos.

**Memoria**

En cuanto al sensor 4.3 se sitúo la grieta entre los electrodos 4 y 5 (Ilustración 6-6). Así, es de esperar que la última medida (40 mm) sea muy superior al resto. En efecto, tal y como se muestra en el gráfico de la Ilustración 6-7 dichas predicciones se cumplen.

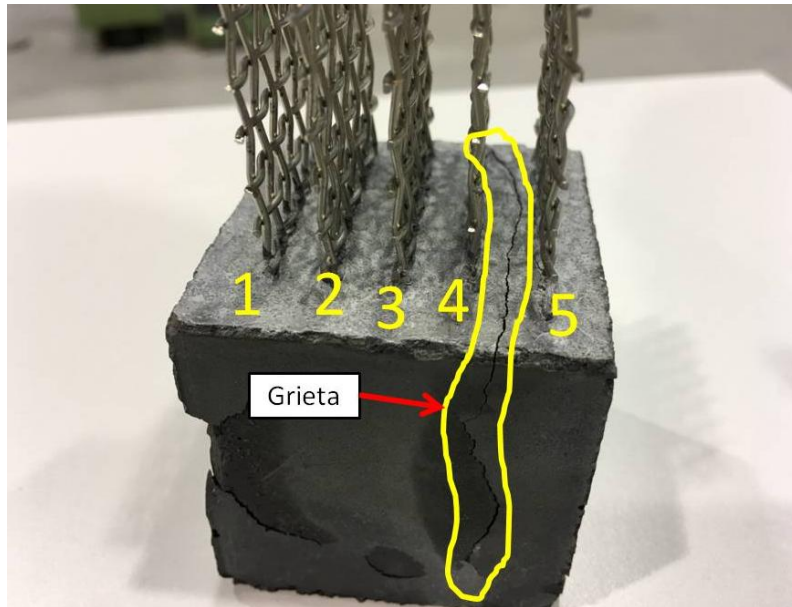


Ilustración 6-6 Numeración de electrodos en el sensor 4.3

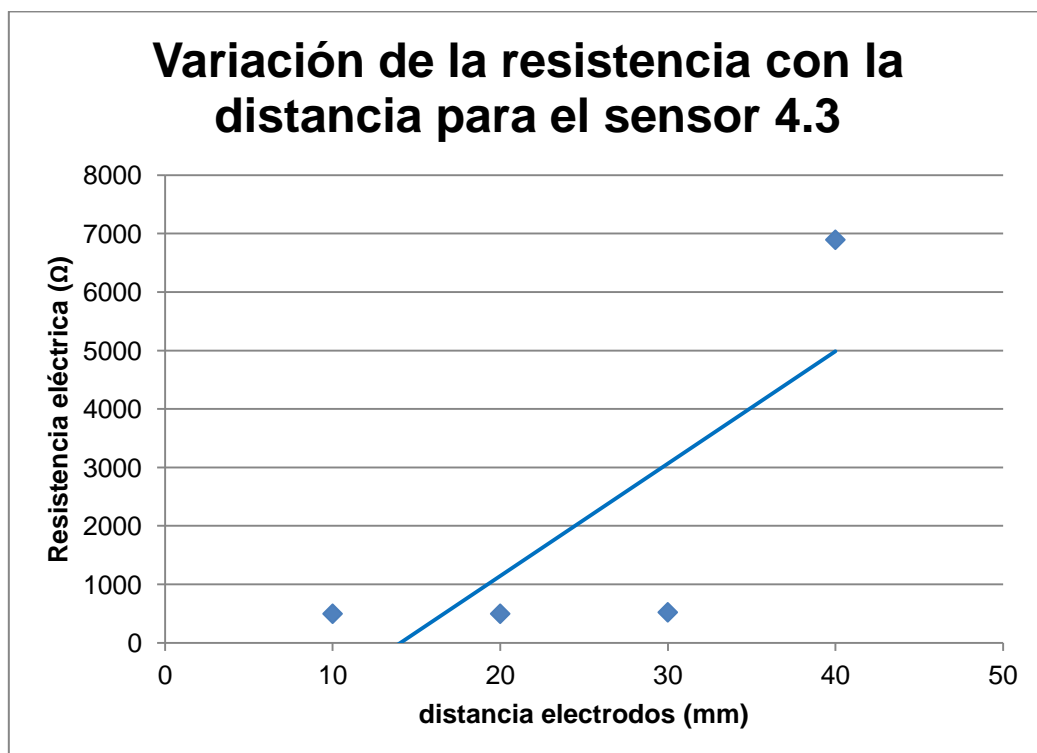
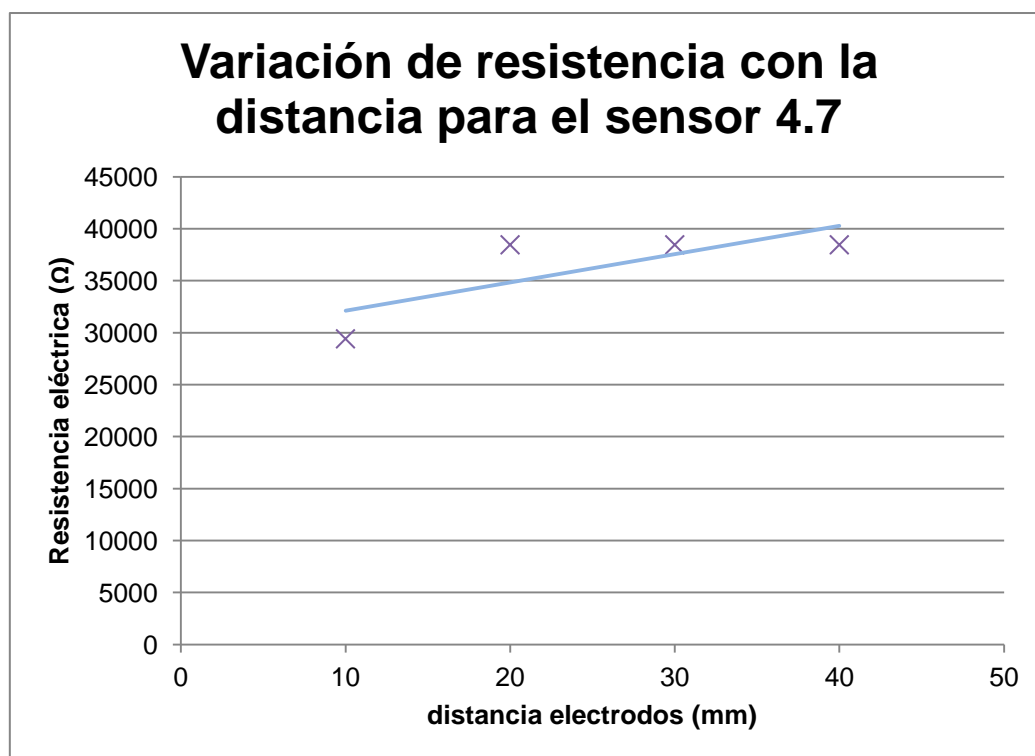


Ilustración 6-7 Variación de la resistencia con la distancia para el sensor 4.3

Con el sensor se procedió al contrario, de forma que la grieta se situase entre los electrodos 1 y 2. Así, la resistencia siempre tendría un valor considerablemente alto. Este comportamiento se representa en la gráfica de la Ilustración 6-8.



**Ilustración 6-8 Variación de la resistencia con la distancia para el sensor 4.7**

En las siguientes gráficas, correspondientes a la Ilustración 6-9, Ilustración 6-10, y Ilustración 6-11, se muestra la variación de la resistencia con la distancia para todos los sensores sin defectos graves (es decir, no se incluyen ni el 4.3 ni el 4.7) a los 28 días después del amasado.

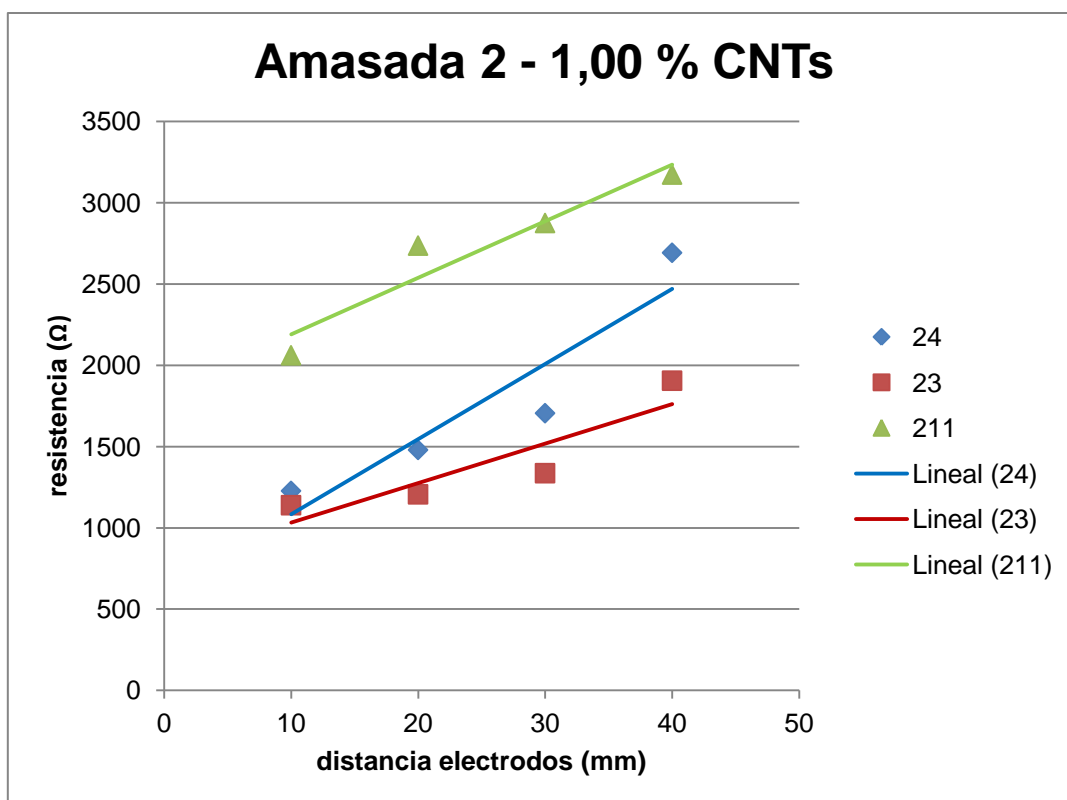


Ilustración 6-9 Variación de la resistencia con la distancia para la amasada nº 2

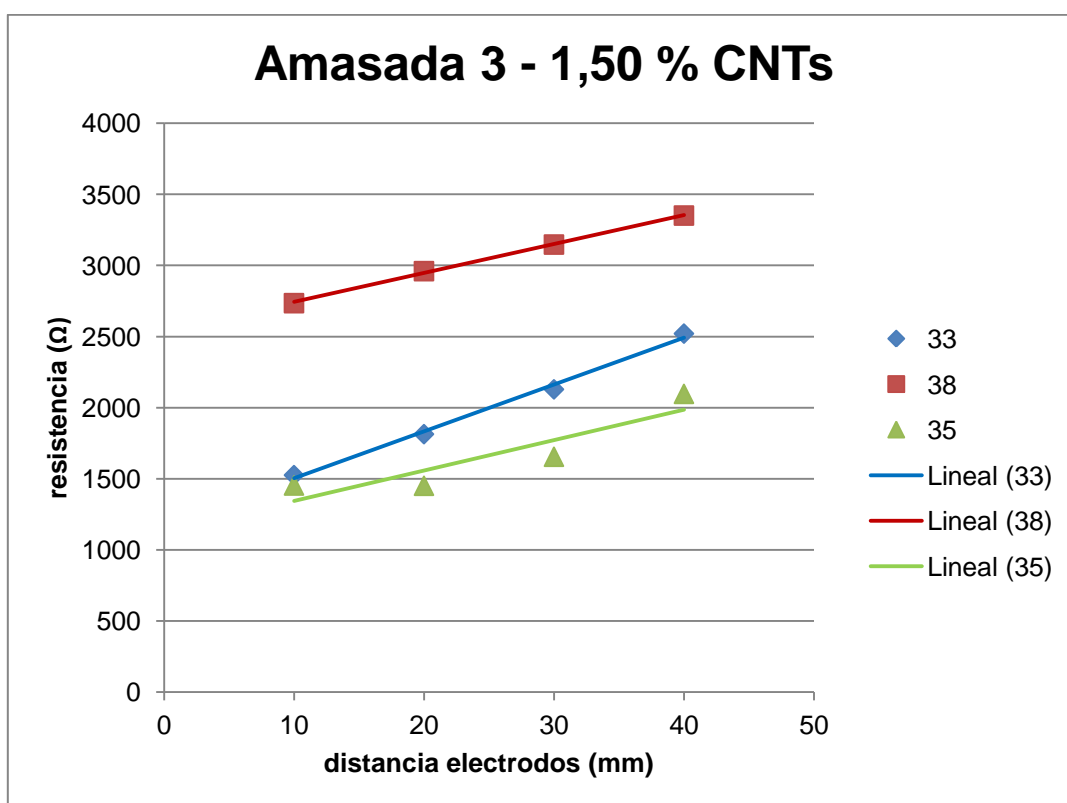


Ilustración 6-10 Variación de la resistencia con la distancia para la amasada nº 3

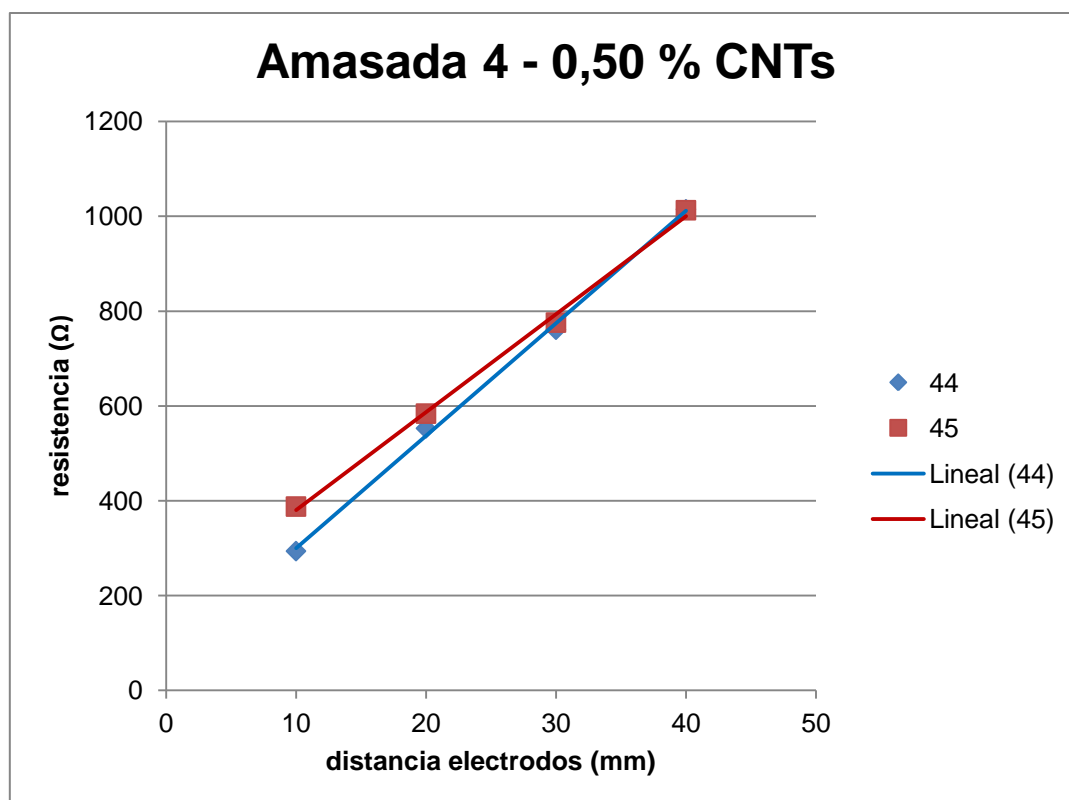


Ilustración 6-11 Variación de la resistencia con la distancia para la amasada nº 4

En general resultan todos los sensores bastante homogéneos, y aparentemente sin defectos graves en su interior. Son los de la amasada nº 2 los que tienen una mayor desviación, pero es lógico, pues estos fueron los más dañados según lo explicado en el apartado 5.5.

## 6.2 Ensayo estático con carga

En este ensayo se pretende estudiar cómo varía la resistencia eléctrica en función de la carga a la que está sometido el sensor, además de evaluar la sensibilidad del mismo. Para ello se ha sometido a cada sensor a un ciclo de compresión estático, es decir, que la velocidad de aplicación de la fuerza es sumamente lenta.

### 6.2.1 Metodología

En primer lugar se aísla eléctricamente los platos de compresión con cinta de carroceros y se coloca el sensor (Ilustración 6-12), el cual es sometido a tres ciclos de compresión-descompresión con el objetivo de reacomodar todas sus partes internas.

## Memoria

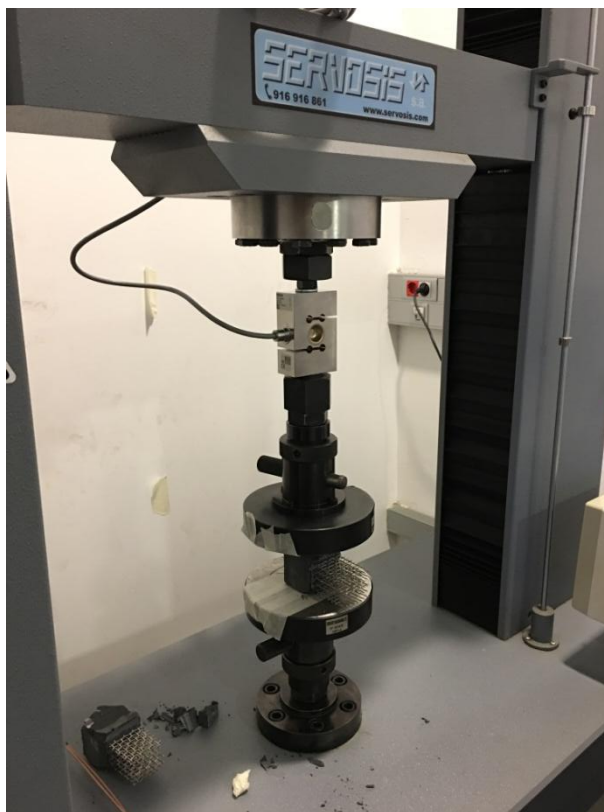


Ilustración 6-12 Sensor debidamente colocado en la máquina de tracción

Cada ciclo de compresión-descompresión consta de una compresión hasta alcanzar los 200 kg a una velocidad de 0.50 mm/min, y una vez alcanzados los 200 kg se descomprime a la misma velocidad hasta que los platos alcanzan su posición inicial.

Posteriormente, después de someter al sensor a los tres ciclos, se deja polarizar durante 10 minutos, para que el efecto de dicha polarización no influya notablemente en los valores de resistencia medidos, y se somete de nuevo a otros tres ciclos iguales a los anteriormente descritos, midiendo en esta ocasión la resistencia eléctrica del sensor.

### 6.2.1.1 Tratamiento matemático de los resultados

Para determinar la sensibilidad del sensor, entendiendo por sensibilidad la facilidad con la que se puede detectar cambios en la carga a la que está sometido, se relacionará la fuerza con la resistencia de forma lineal. Pero para poder comparar dicha sensibilidad con el resto de sensores es necesario adimensionalizar el parámetro de la resistencia, definiendo entonces el **incremento unitario de resistencia** según la Ecuación 6-3.



### Memoria

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R_f - R_0}{R_0}$$

#### Ecuación 6-3 Incremento unitario de resistencia

Donde,  $R_0$  es la resistencia a tiempo infinito (en la práctica de este ensayo se ha usado la resistencia a los 10 minutos que se ha dejado polarizar) y  $R_f$  la resistencia en el momento dado.

Entonces, la variación de resistencia y carga se relaciona mediante la Ecuación 6-4:

$$F = k \cdot \frac{\Delta R}{R_0} + n$$

#### Ecuación 6-4 Relación entre la fuerza y la resistencia

El parámetro 'n' no es más que la ordenada en el origen de la recta, la cual carece de importancia para el análisis de los resultados del presente ensayo.

La sensibilidad se obtiene mediante la pendiente de la recta, k, medida en  $N^{-1}$ . Así pues, cuanto mayor sea este parámetro 'k' mayor será la sensibilidad del sensor.

### 6.2.2 Cadena de medida

Un esquema de la cadena de medida se encuentra en la Ilustración 6-13. En esta cadena se distinguen dos cadenas totalmente independientes. La primera de ellas, formada por el sensor a medir, la unidad de medida y en PC 1, es exactamente la misma del apartado 6.1.2, por lo que se remite a dicho apartado para conocer cualquier detalle de la misma.

La segunda cadena está formada por:

- **PC 2: Controlador máquina tracción.** Es un ordenador de sobremesa DELL Dimension DM051 que equipa el software para controlar la máquina de tracción. Dicho software es PCD 2K, versión 1.3.0.533.
- **Máquina de tracción** Servosis ME-405/10

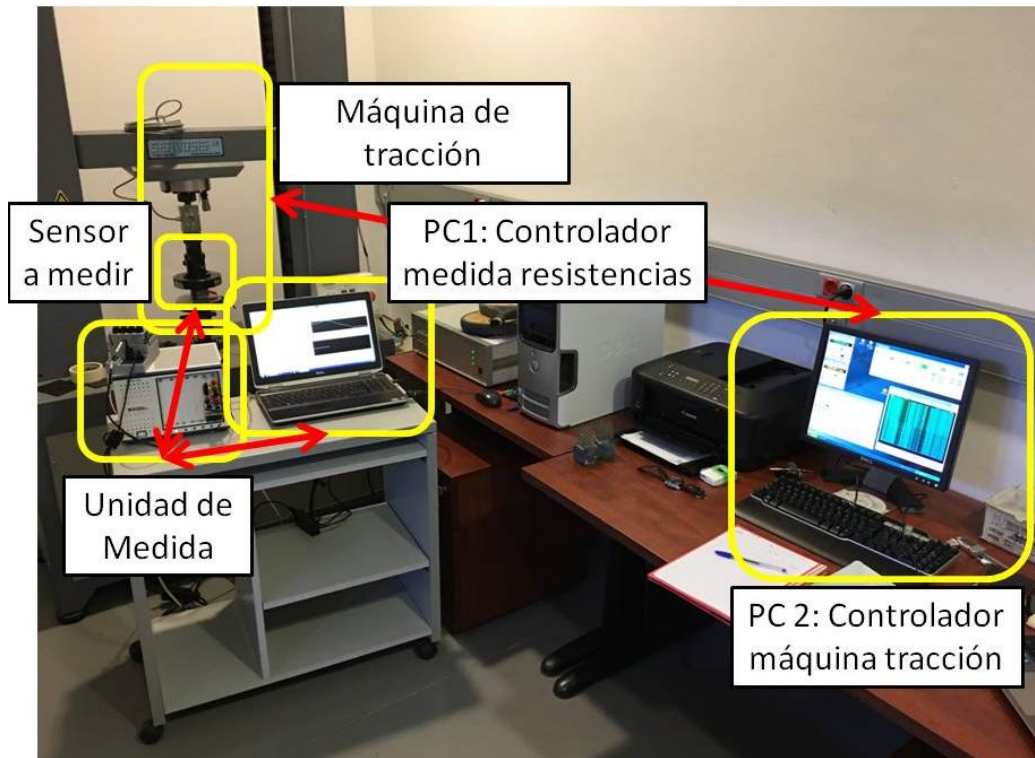


Ilustración 6-13 Cadena de medida para el ensayo estático con carga

### 6.2.3 Resultados, análisis y fenomenología

El tratamiento de datos y resultados pormenorizado solo se mostrará para un sensor, en concreto el 3.3, ya que resultaría muy tedioso para el lector repetir este proceso con todos ellos. En el Anexo D puede consultarse los diferentes datos y resultados de todos ellos.

Recordar que al sensor se le ha aplicado tres ciclos de compresión-descompresión, tal cual se indica en la Ilustración 6-14. Como puede observarse el primer ciclo comienza pasados los 600 segundos que se ha dejado el sensor polarizar. En la Ilustración 6-15 se aprecia como varía la resistencia eléctrica del mismo a lo largo del tiempo, y en la Ilustración 6-16 lo mismo pero con el incremento unitario de resistencia.

Puede comprobarse claramente como cada variación en la fuerza viene acompañada por su correspondiente variación en resistencia. Además, a medida que el sensor se comprime descende la resistencia eléctrica, es decir, se vuelve el sensor más conductor, ya que se cierran grietas y microgrietas, y se disminuye la distancia entre nanotubos, juntándolos cada vez más.

**Memoria**

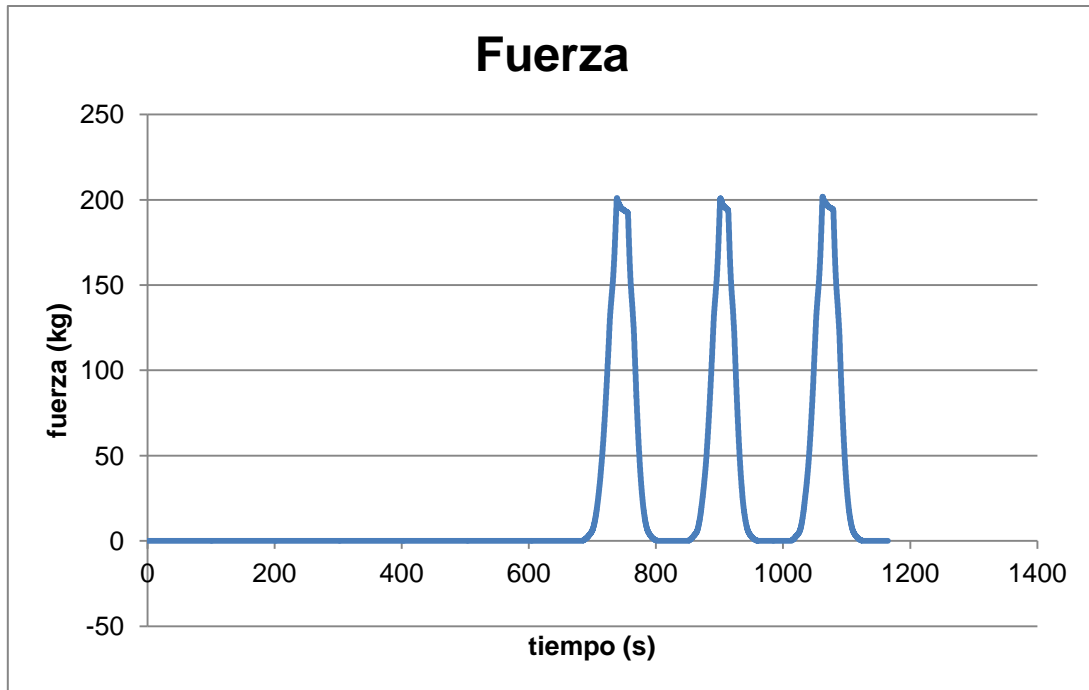


Ilustración 6-14 Carga aplicada al sensor 3.3 en función del tiempo

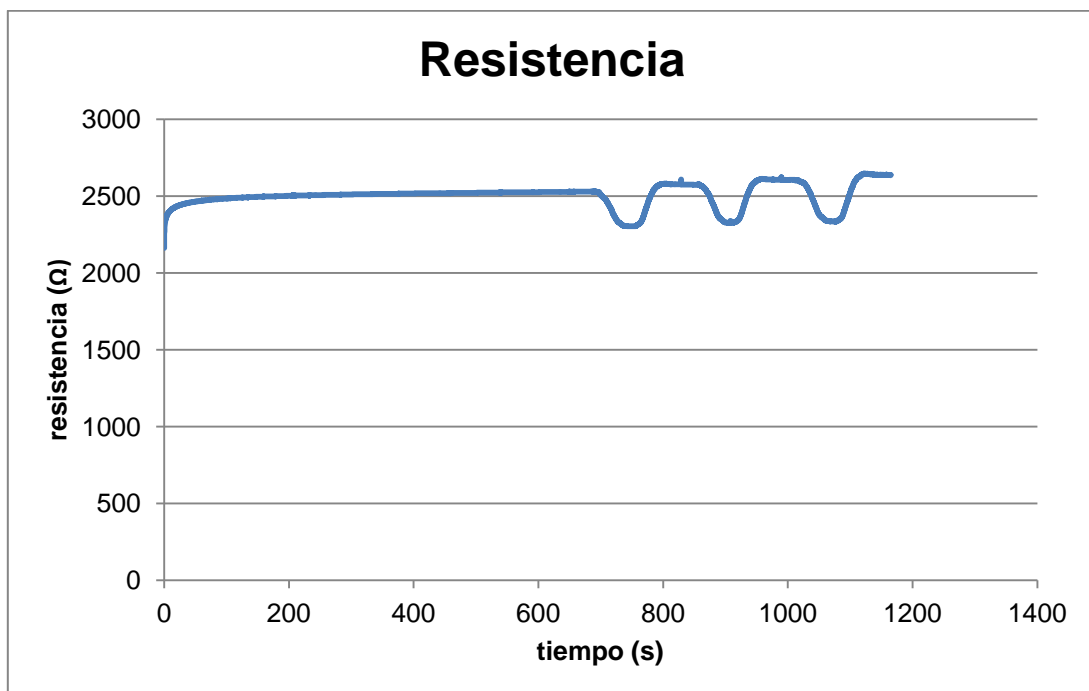
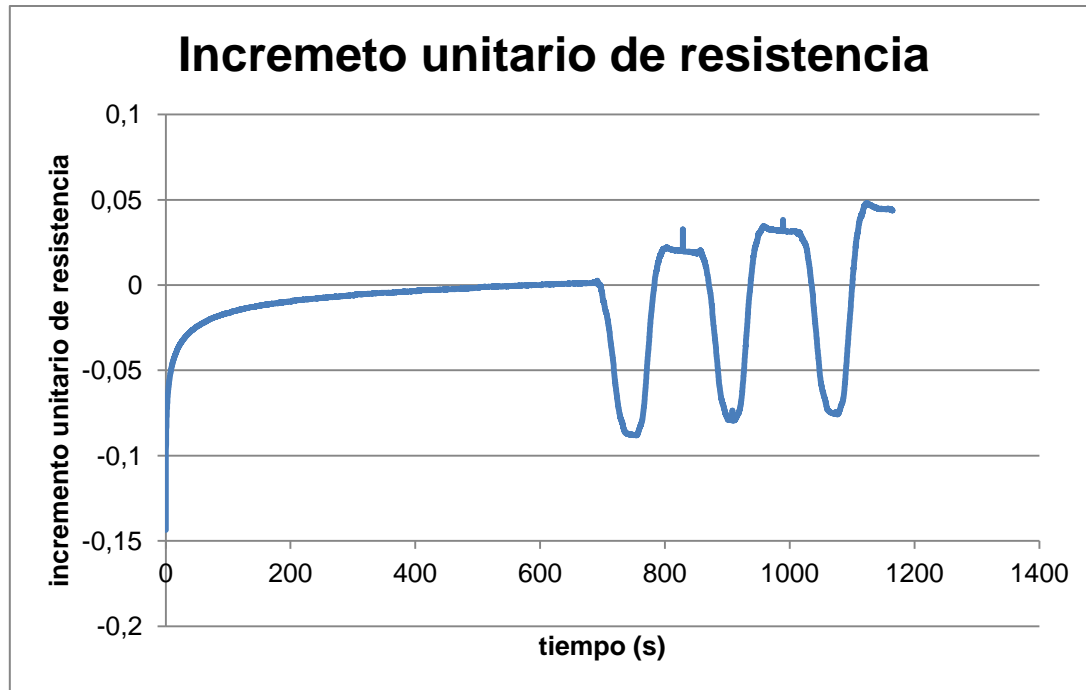


Ilustración 6-15 Variación de la resistencia del sensor 3.3 en función del tiempo



**Ilustración 6-16 Variación del incremento unitario de resistencia del sensor 3.3 en función del tiempo**

Para cada subida y bajada del ciclo de carga puede obtenerse una nube de puntos que relacione la fuerza aplicada con la resistencia (o el incremento unitario de resistencia). Para esta nube de puntos se han suprimido los valores inferiores a 50 kg, ya que es necesario que exista una cierta precarga inicial para cerrar grietas y demás imperfecciones, de forma que no se obtengan valores falseados. Igualmente, también se han omitido los valores superiores a 175 kg. A partir de esta nube de puntos puede obtenerse una recta, cuya pendiente será la sensibilidad del sensor. Decir que cuanto mayor sea la pendiente, en términos de valor absoluto, mayor será la sensibilidad.

A continuación, en la Ilustración 6-17 se muestra la citada nube de puntos y recta para la primera subida del sensor 3.3.

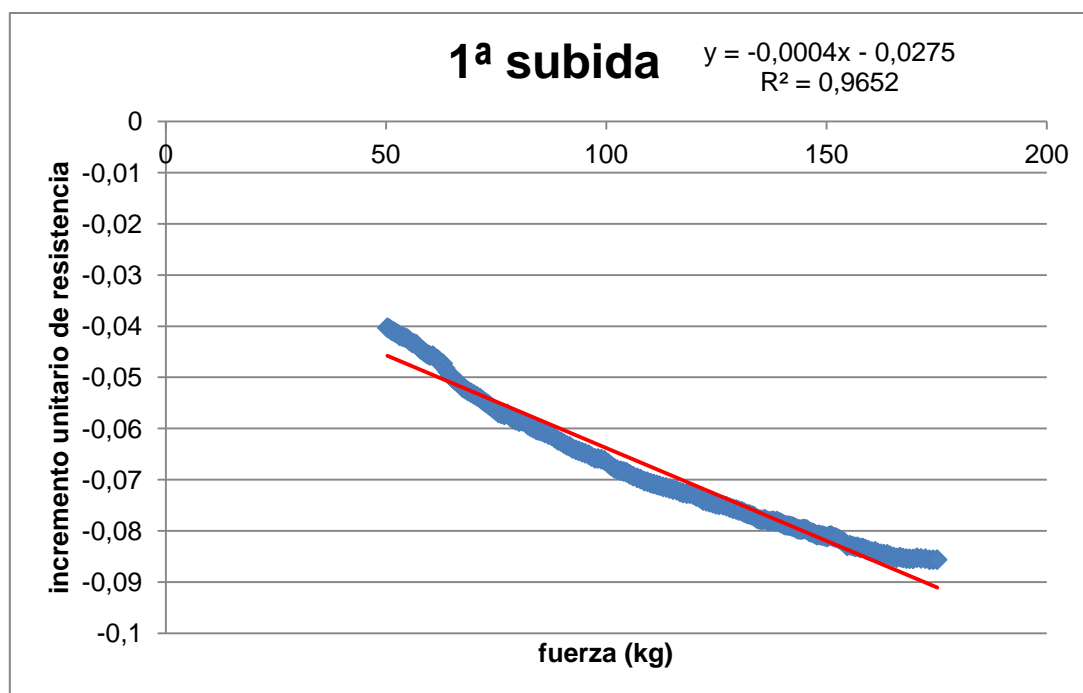
**Memoria**

Ilustración 6-17 Variación de la resistencia unitaria para la primera subida del sensor 3.3

Con todo lo expuesto se da por explicado el proceso de toma de datos y resultados de cada sensor. En las tablas Tabla 6-3, Tabla 6-4, Tabla 6-5, Tabla 6-6, Tabla 6-7, Tabla 6-8, Tabla 6-9 y Tabla 6-10 se recopilan todos los resultados de las tres subidas y las bajadas de los sensores analizados.

38		1s	1b	2s	2b	3s	3b	MEDIA	DESV STD
	k	-0,0006	-0,0005	-0,0006	-0,0006	-0,0007	-0,0006	-0,0006	0,0001
	n	-0,2069	-0,2237	-0,1849	-0,1986	-0,1739	-0,1802	-0,1947	0,0187
	R <sup>2</sup>	0,9213	0,9504	0,9294	0,9637	0,9214	0,9652	0,9419	0,0205

Tabla 6-3 Resultados del sensor 3.8

35		1s	1b	2s	2b	3s	3b	MEDIA	DESV STD
	k	-0,0004	-0,0004	-0,0006	-0,0004	-0,0004	-0,0005	-0,0005	0,0001
	n	-0,0275	-0,0217	-0,0016	-0,008	-0,0094	0,0032	-0,0108	0,0117
	R <sup>2</sup>	0,9652	0,9554	0,9928	0,9612	0,9575	0,9745	0,9678	0,0140

Tabla 6-4 Resultados del sensor 3.5

33		1s	1b	2s	2b	3s	3b	MEDIA	DESV STD
	k	-0,0003	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	0,0000
	n	-0,0832	-0,1066	-0,09	-0,0964	-0,0887	-0,0931	-0,0930	0,0080
	R <sup>2</sup>	0,9786	0,935	0,993	0,9011	0,9963	0,873	0,9462	0,0515

Tabla 6-5 Resultados del sensor 3.3

**Memoria**

23		1s	1b	2s	2b	3s	3b	MEDIA	DESV STD
	k	-0,0003	-0,0004	-0,0003	-0,0003	-0,0003	-0,0004	-0,0003	0,0001
	n	-0,0066	0,0058	0,0058	0,0167	0,0237	0,0472	0,0154	0,0187
	R <sup>2</sup>	0,9881	0,9914	0,9754	0,9864	0,959	0,9448	0,9742	0,0186

Tabla 6-6 Resultados del sensor 2.3

211		1s	1b	2s	2b	3s	3b	MEDIA	DESV STD
	k	-0,0003	-0,0002	-0,0002	-0,0001	-0,0002	-7,00E-05	-0,0002	0,0001
	n	0,0085	-0,0022	0,0081	-0,0026	0,0046	-0,0033	0,0022	0,0055
	R <sup>2</sup>	0,9825	0,9759	0,8984	0,8970	0,8712	0,7980	0,9038	0,0689

Tabla 6-7 Resultados del sensor 2.11

43		1s	1b	2s	2b	3s	3b	MEDIA	DESV STD
	k	-0,0002	-0,0001	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0002	0,0000
	n	-0,934	-0,9425	-0,937	-0,9383	-0,9374	-0,9349	-0,9374	0,0030
	R <sup>2</sup>	0,9376	0,9296	0,9315	0,938	0,9258	0,9514	0,9357	0,0090

Tabla 6-8 Resultados del sensor 4.3

45		1s	1b	2s	2b	3s	3b	MEDIA	DESV STD
	k	-3,00E-05	-2,00E-05	-3,00E-05	-2,00E-05	-3,00E-05	-1,00E-05	-2,33E-05	0,0000
	n	0,0012	0,0016	0,004	0,0053	0,0073	0,0064	0,0043	0,0025
	R <sup>2</sup>	0,9892	0,9944	0,9848	0,9911	0,9927	0,4995	0,9086	0,2005

Tabla 6-9 Resultados del sensor 4.5

44		1s	1b	2s	2b	3s	3b	MEDIA	DESV STD
	k	-5,00E-06	-7,00E-06	-5,00E-06	-6,00E-06	-7,00E-06	-7,00E-06	-6,17E-06	0,0000
	n	0,0009	0,0015	0,0028	0,0034	0,005	0,0051	0,0031	0,0017
	R <sup>2</sup>	0,9055	0,962	0,9813	0,9586	0,9894	0,7897	0,9311	0,0752

Tabla 6-10 Resultados del sensor 4.4

A partir de estos resultados puede obtenerse la sensibilidad de cada sensor como la media de las seis sensibilidad, y la ecuación de la recta que define su comportamiento. En la Ilustración 6-18 e Ilustración 6-19 se grafican estos datos para la amasada nº 3; en la Ilustración 6-20 e Ilustración 6-21 para la 2, y finalmente en la Ilustración 6-22 e Ilustración 6-23 para la nº 4.



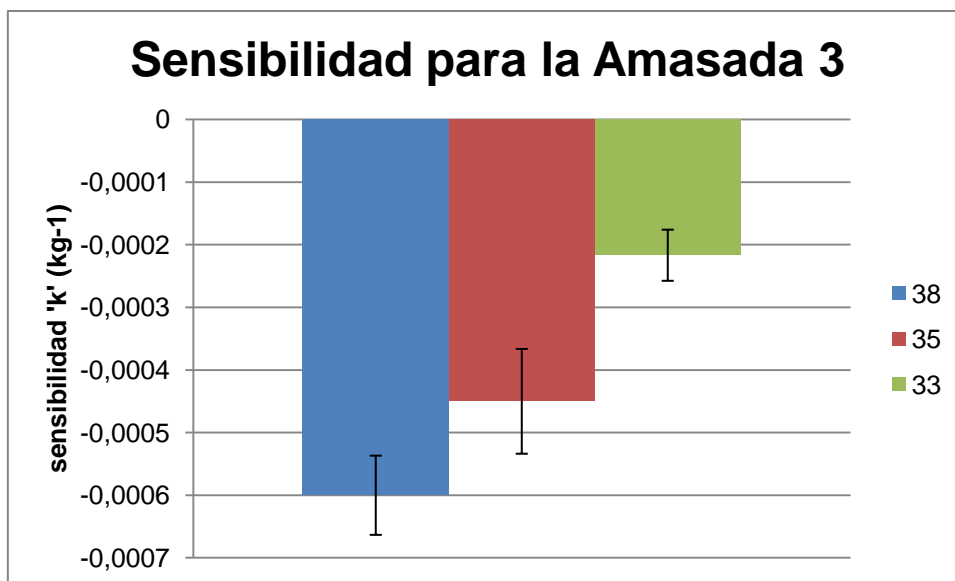


Ilustración 6-18 Sensibilidad de la amasada nº 3

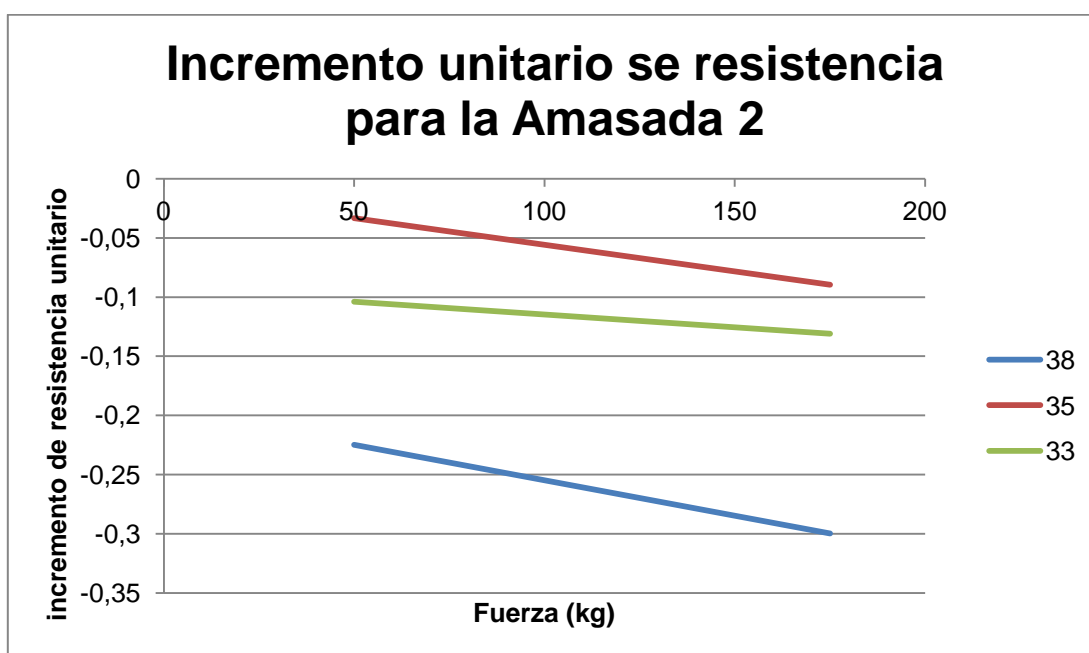


Ilustración 6-19 Incremento unitario de resistencia para la amasada nº 2

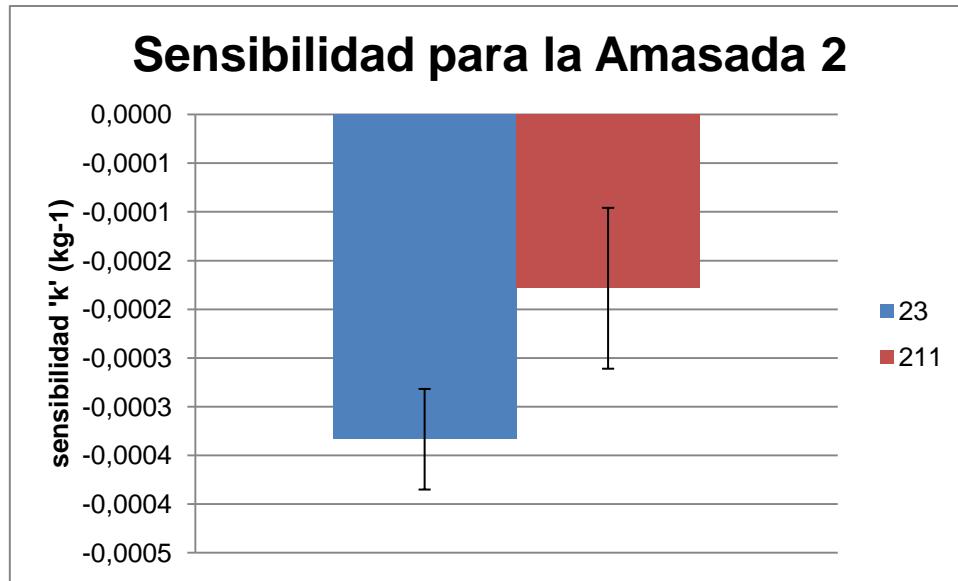


Ilustración 6-20 Sensibilidad de la amasada nº 2

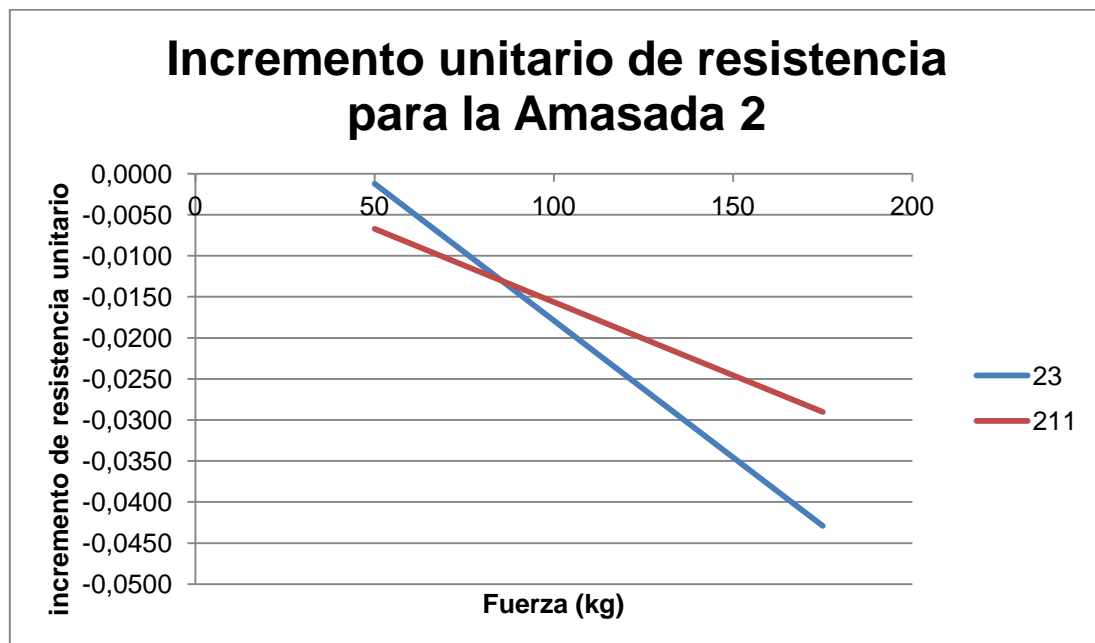


Ilustración 6-21 Incremento unitario de resistencia para la amasada nº 3

**Memoria**

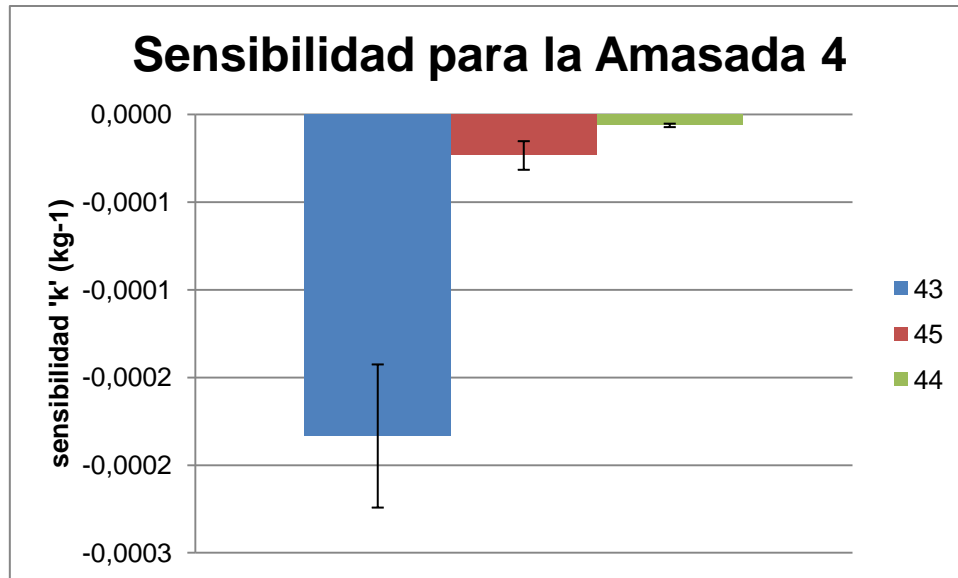


Ilustración 6-22 Sensibilidad de la amasada nº 4

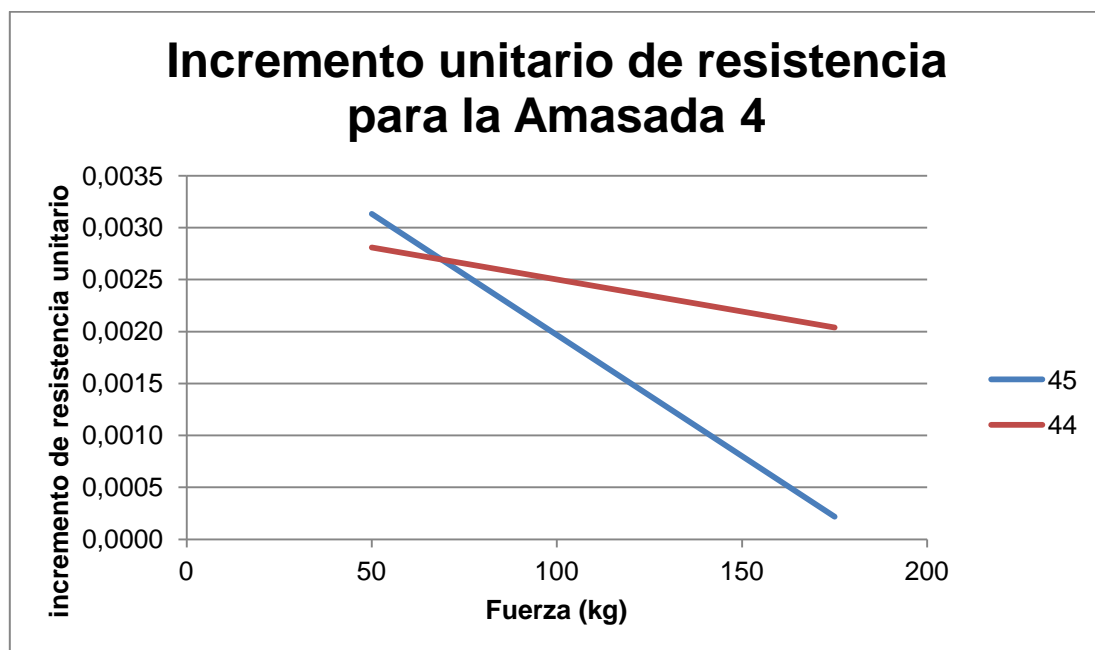


Ilustración 6-23 Incremento unitario de resistencia para la amasada nº 4

**Memoria**

Por último cabría analizar la sensibilidad global para cada porcentaje de CNTs, encontrándose dichos resultados en la Tabla 6-11, Ilustración 6-24 e Ilustración 6-25.

% CNTs	MEDIA	DESV. STD.
0.50	-0,0001	9,77E-05
1.00	-0,0003	0,00011
1.50	-0,0004	0,000193

Tabla 6-11 Sensibilidad según % de CNTs

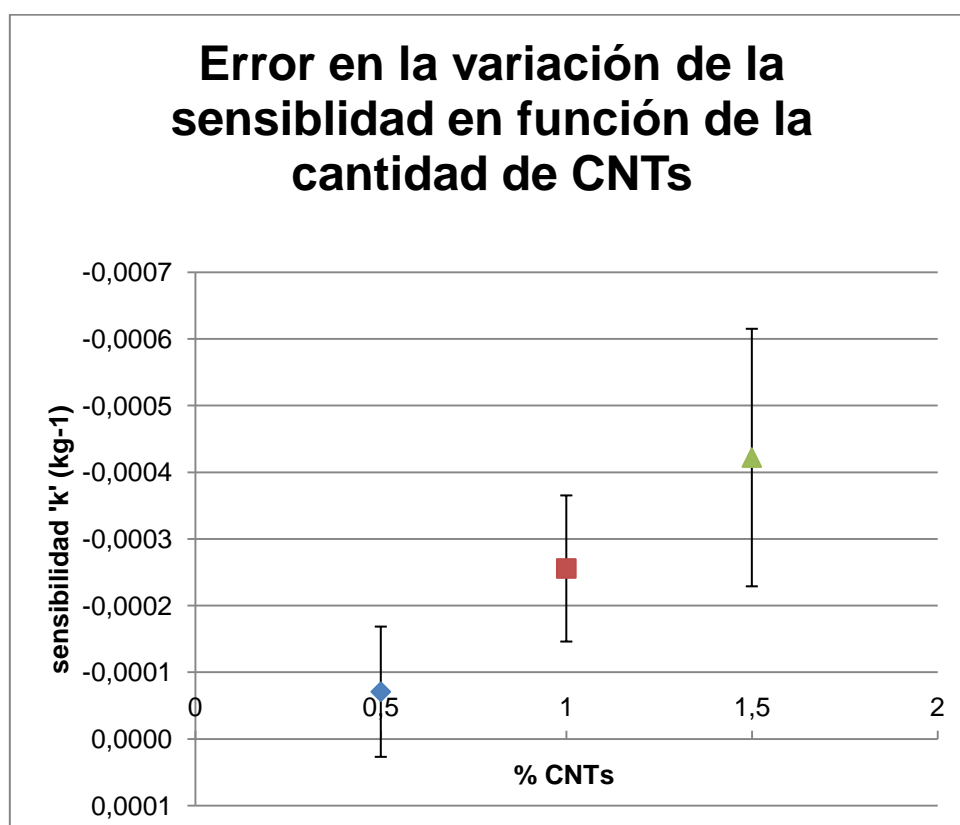


Ilustración 6-24 Sensibilidad según % de CNTs

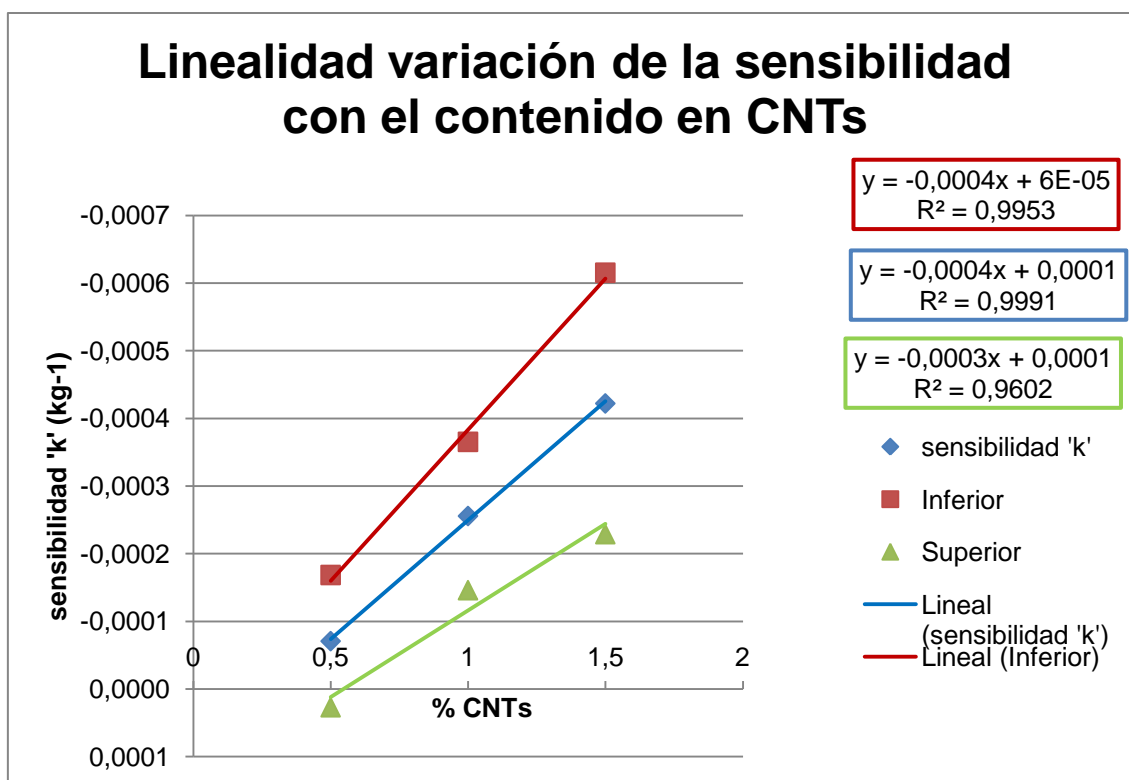


Ilustración 6-25 Linealidad en la variación de la sensibilidad según % CNTs

### 6.2.3.1 Fenomenología

Algunos sensores han presentado un comportamiento un tanto extraño y peculiar. En este apartado 6.2.3.1 se dará una posible explicación a dicho comportamiento.

- **Sensor 2.3.** En la Ilustración 6-26 se presenta una de las gráficas obtenida con el incremento unitario de resistencia en función de la carga aplicada. Todas las demás son similares a ella. Se diferencian tres zonas: una pequeña recta horizontal sobre los 50-60 kg, una recta con una pendiente más acusada entre 70-90 kg, y por último otra recta de menor pendiente a partir de los 90 kg.

En la Ilustración 6-27 se ve como hay parte del electrodo que no está envuelto por el sensor. Así, hasta que no se llega a una determinada carga en esa zona no entra el material en contacto con la malla, por lo que la resistencia permanece más o menos constante. Posteriormente, hay un tramo con una fuerte sensibilidad (mayor pendiente) debido a que se están cerrando las múltiples grietas y huecos (Ilustración 6-28). Finalmente, cuando el valor de la carga aplicada es lo suficientemente alto el sensor trabaja correctamente, de forma más o menos lineal. Este comportamiento corresponde al tercer tramo. Es esta la razón por la que

### Memoria

para el tratamiento de datos del sensor 2.3 solo se han tenido en cuenta los incrementos unitarios de resistencia entre 100 y 175 kg.

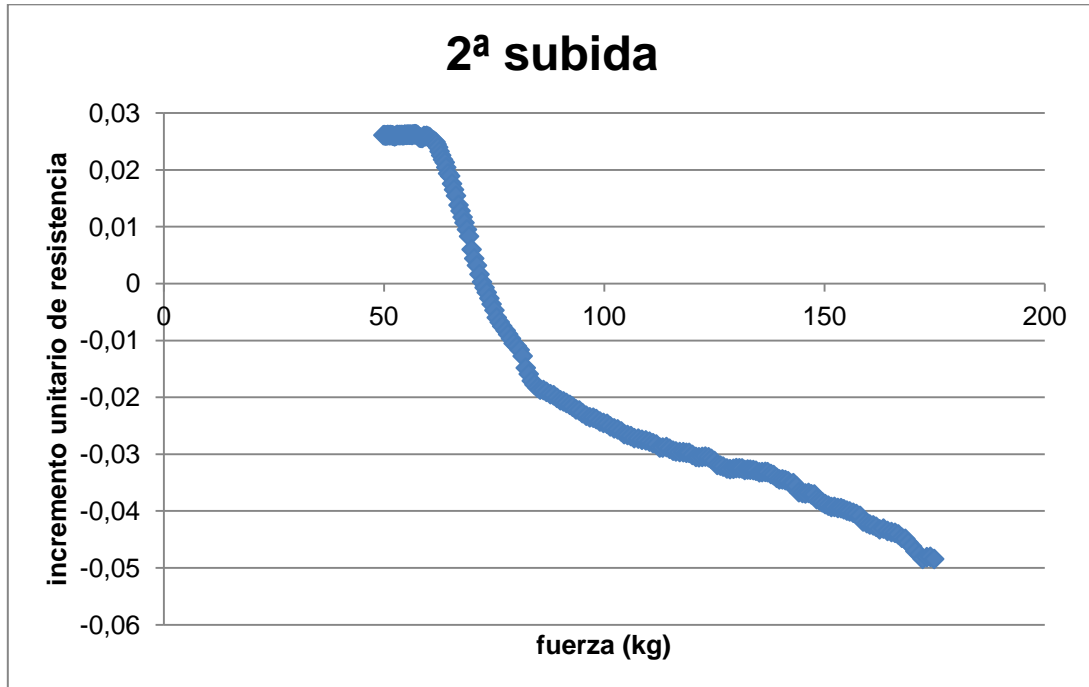


Ilustración 6-26 Incremento unitario de resistencia en función de la carga para el sensor 2.3 en la 2ª subida

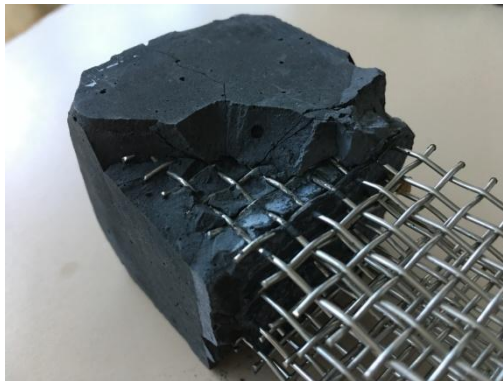


Ilustración 6-27 Defecto (1) sensor 2.3



**Memoria**



Ilustración 6-28 Defecto (2) sensor 2.3

- **Sensor 2.4.** En la Ilustración 6-29 se muestra una nube de puntos en la que cada uno de ellos representa el incremento unitario de resistencia para cada valor de la fuerza. Esta nube de puntos corresponde a todo el ensayo (tiempo de polarización más los tres ciclos) del sensor 2.4. Salta a la vista que el comportamiento es totalmente aleatorio. Esto es debido a que el sensor se encontraba totalmente destrozado, puesto que accidentalmente se sometió a una carga de 500 kg. Es por ello que los datos obtenidos no han formado parte del análisis.

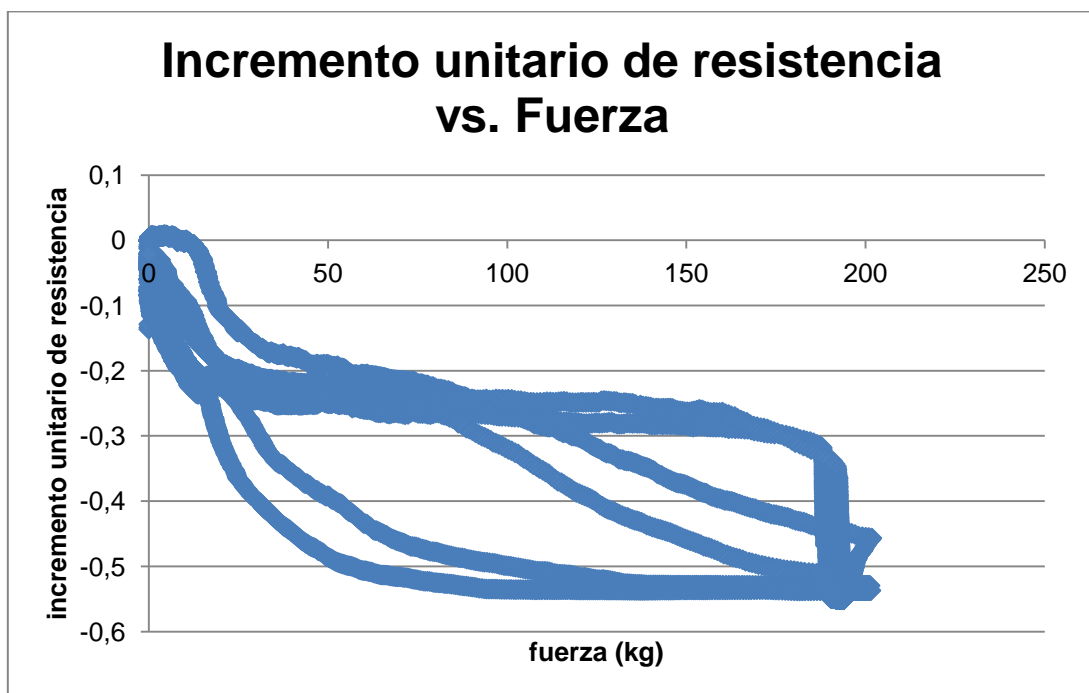


Ilustración 6-29 Nube de puntos del incremento unitario de resistencia en función de la fuerza para el sensor 2.4

**Memoria**



Ilustración 6-30 Sensor 2.4 (1)

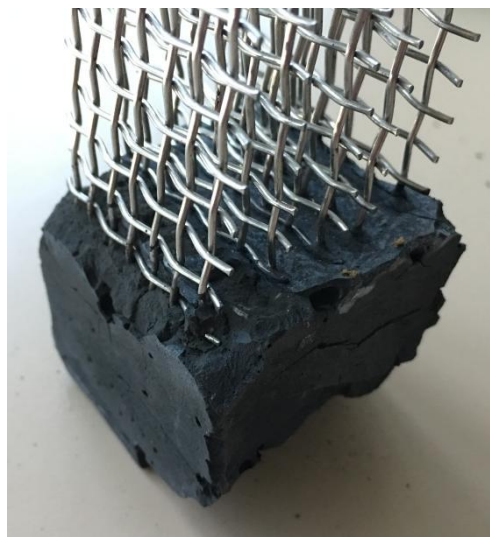


Ilustración 6-31 Sensor 2.4 (2)

- **Sensor 3.3.** En la Ilustración 6-32 se muestra una de las curvas de comportamiento del sensor 3.3, siendo todas las demás similares. En ella se aprecian dos zonas, cada una de ellas correspondiente a un recta de diferente pendiente. Observando el sensor 3.3 (Ilustración 6-33) no se aprecia ningún tipo de defecto considerable que justifique este comportamiento. Dando un paso más allá en esta explicación, la pendiente de la primera recta es muy mayor que la de la segunda, y acorde a lo explicado para el sensor 2.3, se puede intuir que dentro del sensor 3.3 hay alguna grieta o burbuja importante. En este caso, los datos utilizados en el estudio han sido los correspondientes a cargas superiores a 100 kg.

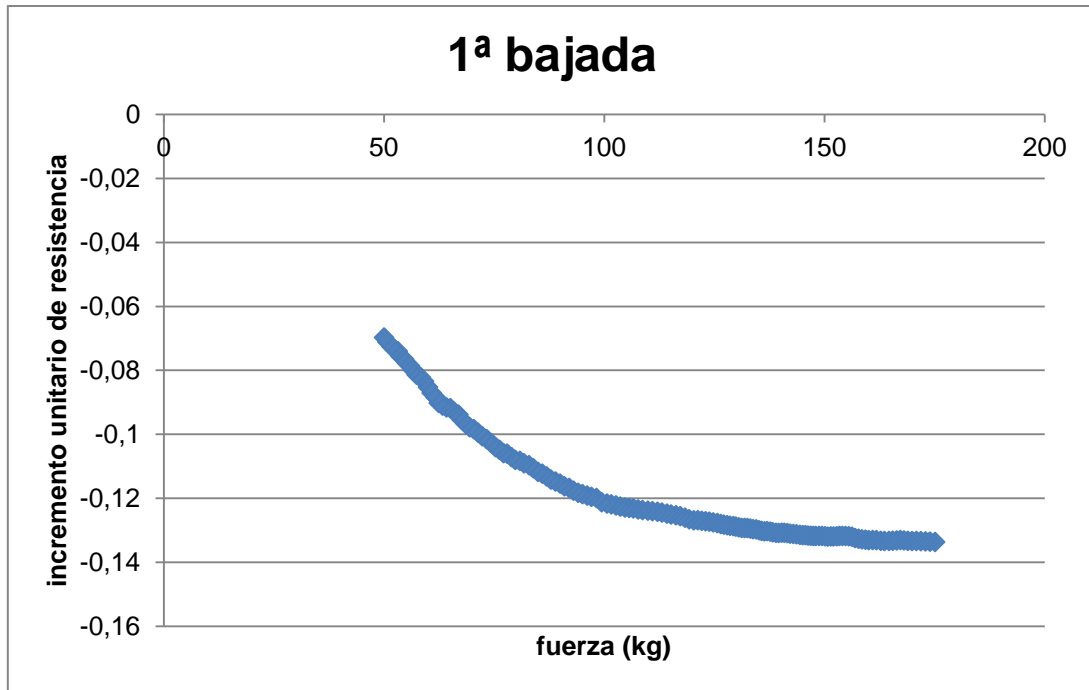


Ilustración 6-32 Incremento unitario de resistencia en función de la fuerza para la 1ª bajada del sensor 3.3



Ilustración 6-33 Sensor 3.3

#### 6.2.4 Conclusiones

La repetibilidad de la sensibilidad para cada sensor es excelente, pero entre los sensores de una misma amasada es bastante pobre, tal y como puede verse en la Ilustración 6-18, Ilustración 6-20 e Ilustración 6-22.

Los sensores con un porcentaje de 1.50 % y 1.00 % de CNTs presentan una buena sensibilidad, apreciándose esto en la facilidad para reconocer las

**Memoria**

variaciones de resistencia eléctrica cuando se le ha aplicado el ciclo de compresión-descompresión.

Por último cabe destacar la linealidad entre la sensibilidad y la cantidad de CNTs (Ilustración 6-25), de forma que cuanto mayor sea el porcentaje de CNTs mayor será la sensibilidad. Según la ecuación de la recta de ajuste, para cantidades inferiores al 0.25 % de CNTs la sensibilidad sería nula.

## 7 MEDIDA EXPERIMENTAL EN CASOS REALES

### 7.1 Descripción del ensayo

El objetivo que se persigue con el presente ensayo es el de determinar la frecuencia propia de una estructura. En concreto se determinará la frecuencia propia de una viga biapoyada (Ilustración 7-1).

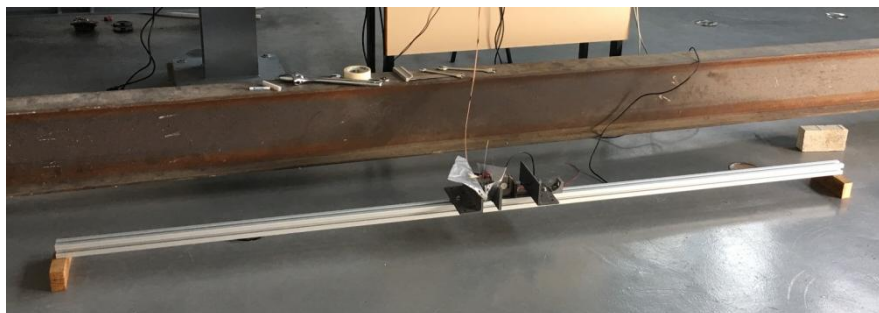


Ilustración 7-1 Viga biapoyada a ensayar

Para ello se ha colocado el sensor, y los diferentes elementos como una célula de carga o el sistema de agarre y precarga (Ilustración 7-2), de tal forma que el centro de masa del conjunto coincida con el punto medio de la viga. A continuación se aplica una precarga al sensor, del orden de los 100 kg, para cerrar las grietas y asegurar que siempre trabaje en compresión. Dicha precarga se aplica con un perno.

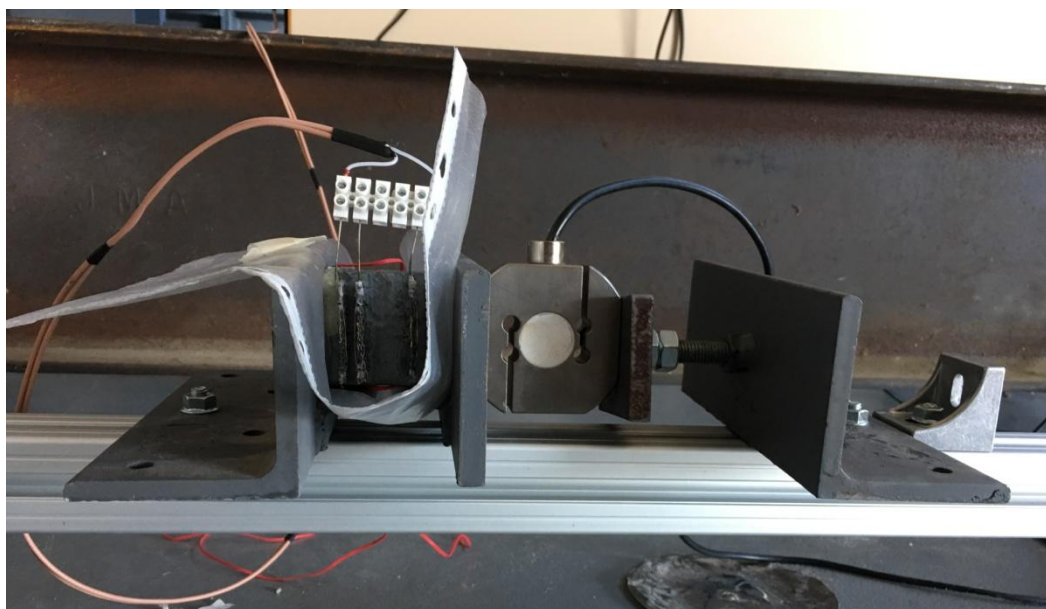


Ilustración 7-2 Elementos sobre el punto medio la viga

Con todo lo anterior, se procede a aplicarle unos golpes a la viga, lo que provoca que comience a flectar durante un tiempo, de forma que cuando el centro del vano baja se comprime más el sensor, y cuando sube se descomprime un poco. Esta sucesión de compresiones, y en definitiva de

variaciones de resistencia eléctrica en el sensor, describe una señal ondulatoria, a partir de la cual se puede conocer la frecuencia propia de la viga mediante un análisis armónico o de Fourier.

El interés de conocer la frecuencia propia de una estructura se fundamenta en que si la frecuencia cambia con el tiempo se ha producido un cambio en la estructura, aunque no se pueda determinar la magnitud de dicho cambio. Por ejemplo, supóngase que el día de hoy se termina de construir un puente y se mide la frecuencia propia del mismo. Pasados diez años tiene lugar un terremoto y se vuelve a medir. Si se obtiene el mismo valor, considerando cierto margen de error, se podrá afirmar que el puente no presenta ningún tipo de daño estructural. Una de las ventajas que presenta este método de SHM es la rapidez y economía en la evaluación de los posibles daños, ya que no sería necesario contar con un numeroso equipo de técnicos que realicen pruebas más costosas y complejas.

En cuanto a la cadena de medida, es exactamente la misma que la especificada en el apartado 6.1.2.

### **7.1.1 Conceptos teóricos**

A continuación se explica brevemente varios conceptos claves para poder entender el ensayo que ocupa este apartado número 7.

#### **7.1.1.1 Frecuencia propia**

La frecuencia propia se define como la frecuencia de oscilación de un sistema que está sometido a una vibración sin aplicación de fuerzas externas.

El montaje sobre la viga se puede aproximar a un sistema de un grado de libertad, es decir, se simplifica como un cuerpo de masa ' $m$ ' que se desplaza a lo largo del eje vertical, unido a un muelle de rigidez ' $k$ ' y a un amortiguador con coeficiente de amortiguamiento ' $c$ '.

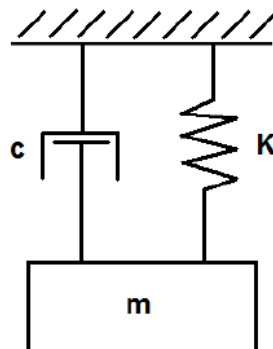


Ilustración 7-3 Sistema de 1 gld (Osuna Toro, 2013)



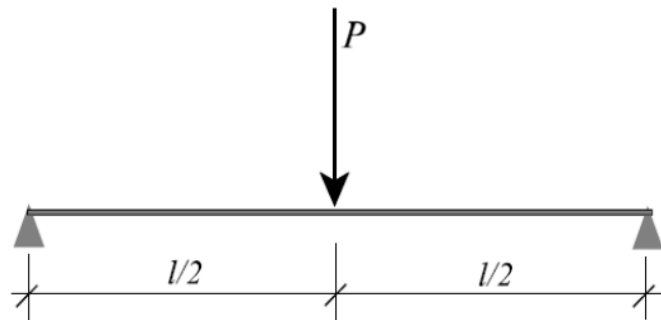
**Memoria**

Simplificando aún más el planteamiento se considera que el coeficiente de amortiguamiento es muy pequeño, luego se elimina el amortiguamiento. Así, la rigidez 'k' será la rigidez de la viga, y la masa 'm' será la suma de los diferentes elementos colocados en el centro del vano. De esta forma, la frecuencia propia 'ω' viene dada por la Ecuación 7-1.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

**Ecuación 7-1 Frecuencia propia de un sistema de 1 gld**

Entonces, considerando una carga puntual 'P' en el centro de la viga que corresponde a la masa de los elementos sobre ella (Ilustración 7-4), la frecuencia propia viene dada por la Ecuación 7-2 en rad/s (en Hz si se utiliza la Ecuación 7-3).



**Ilustración 7-4 Viga apoyada en los extremos y sometida a una carga puntual P en el centro de la viga (Magato Suárez, y otros, 2010)**

$$\omega = \sqrt{\frac{484EI}{\frac{P}{g} \cdot l^3}}$$

**Ecuación 7-2 Frecuencia propia de una viga biapoyada y con carga puntal en el centro del vano en rad/s**

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{484EI}{\frac{P}{g} \cdot l^3}}$$

**Ecuación 7-3 Frecuencia propia de una viga biapoyada y con carga puntal en el centro del vano en Hz**

En la Ecuación 7-2y en la Ecuación 7-3, el parámetro 'E' corresponde al módulo de elasticidad del material, 'I' a la inercia, 'l' a la distancia entre apoyos y 'P/g' a la masa.

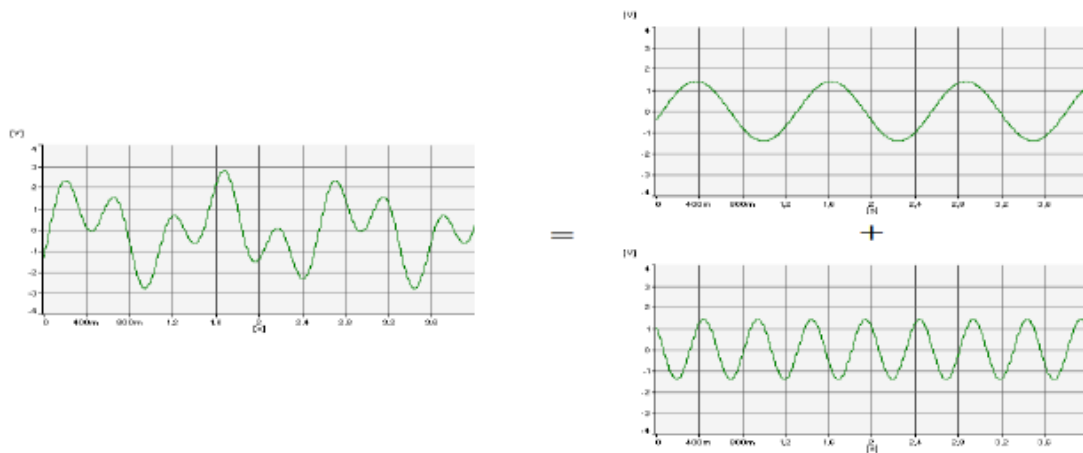
A continuación se calculará la frecuencia propia teórica de la viga usada para el ensayo. Según el catálogo del fabricante, el perfil es de aluminio, con un módulo de Young de  $70 \cdot 10^9$  Pa y una inercia de  $10.7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$ . La distancia entre apoyos es de 2.8 m y la masa total de los diferentes elementos es de 6.8 kg. Sustituyendo en la Ecuación 7-3 se obtiene que la frecuencia propia es de 7.8107 Hz.

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{484EI}{\frac{P}{g} \cdot l^3}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{484 \cdot (70 \cdot 10^9 \text{ Pa}) \cdot (10.7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4)}{6.8 \text{ kg} \cdot (2.8 \text{ m})^3}} = 7.8107 \text{ Hz}$$

**Ecuación 7-4 Cálculo de la frecuencia propia teórica de la viga del ensayo**

### 7.1.1.2 Análisis armónico o de Fourier

El análisis armónico o de Fourier consiste en la descomposición de una señal en varias señales que sigan patrones conocidos. Así pues, cualquier onda oscilatoria periódica puede ser descompuesta en una suma de finitas (o infinitas) ondas sinusoidales.



**Ilustración 7-5 Análisis armónico (Osuna Toro, 2013)**

Por ejemplo, si se tiene la onda de la izquierda de la Ilustración 7-6, que corresponde a un análisis temporal, resulta imposible conocer las ondas que componen la señal. Sin embargo, al hacer la transformación de análisis temporal a análisis frecuencial, puede comprobarse que la onda se compone por dos ondas sinusoidales, una de valor 1 V y frecuencia 300 Hz, y la otra de valor 0.5V y frecuencia 50 Hz.

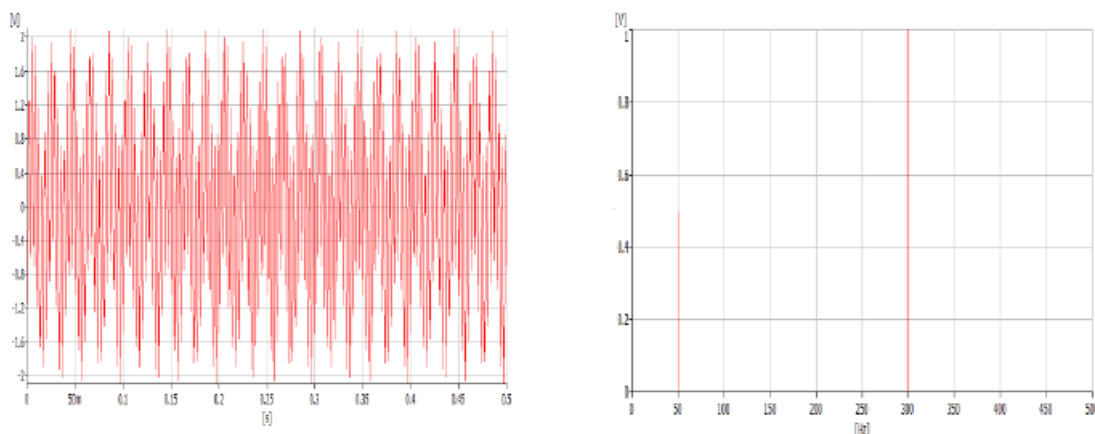


Ilustración 7-6 Análisis temporal (izquierda) y frecuencial (derecha) (Osuna Toro, 2013)

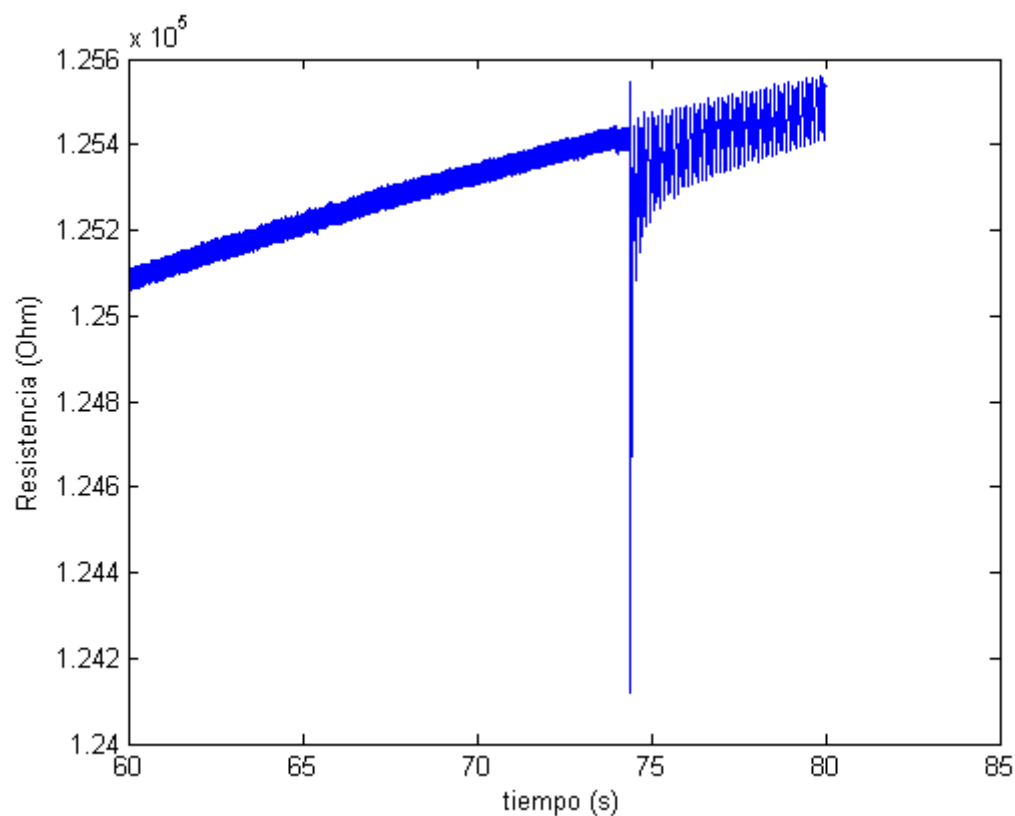
Cabría diferenciar y definir a continuación tres conceptos clave en el análisis de Fourier, y que cualquier persona no experta podría confundir:

- **Transformada de Fourier.** Análisis que consiste en la transformación de una señal no periódica finita en una señal periódica mediante la repetición de la misma, con un intervalo  $T$  entre cada una de ellas. Así, se puede aplicar un “análisis armónico” a la señal. La distancia entre intervalos  $T$  se va aumentando, de forma que cuanto mayor es  $T$ , menor es la importancia de la señal repetida en el análisis de armónicos.
- **Transformada discreta de Fourier (TDF).** Método para calcular la Transformada de Fourier mediante la discretización de la señal en intervalos  $\Delta t$  y posterior integración numérica.
- **Transformada rápida de Fourier (FFT).** El principal problema de la TDF es que es un método muy complejo y consume gran cantidad de recursos. La FFT es una simplificación del mismo.

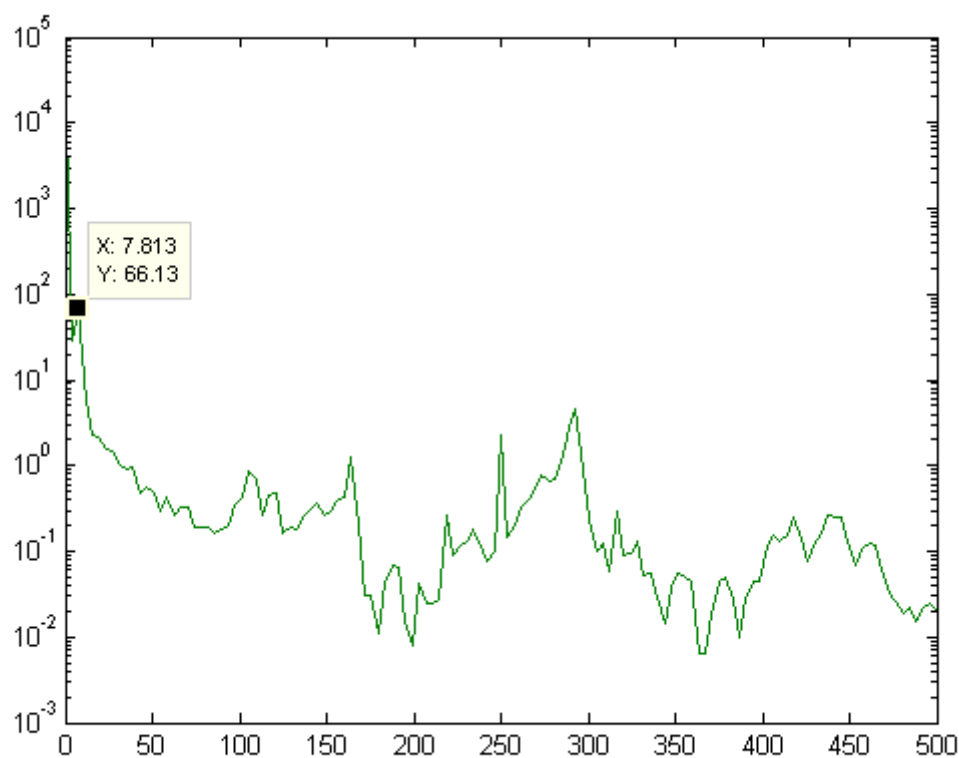
La importancia de la FFT en este ensayo radica en la obtención experimental de la frecuencia propia de la viga. A la señal obtenida con las variaciones de resistencia del sensor se aplica un FFT, obteniendo las diferentes sinusoidales que la conforman. Así, en el análisis frecuencial, la señal con mayor amplitud será la de la frecuencia propia, siendo esta la frecuencia de dicha señal.

Por ejemplo, en la Ilustración 7-7 se puede ver la señal con la resistencia del sensor en función del tiempo, en el momento de un golpe. Si a esta señal se aplica una FFT se obtiene la gráfica de la Ilustración 7-8, donde el eje de abscisas representa la frecuencia en Hz, y el de ordenadas al amplitud de la señal. Puede verse que la frecuencia propia de la viga corresponde al pico dominante, siendo de 7.813 Hz.

**Memoria**



**Ilustración 7-7 Variación de la resistencia eléctrica en el momento de un golpe sobre la viga**



**Ilustración 7-8 FFT a la señal de la Ilustración 7-7**

## **7.2 El ruido eléctrico**

Uno de los problemas a la hora de realizar cualquier medición en la resistencia eléctrica de los sensores es el llamado ruido eléctrico.

Por ruido se entiende toda componente de tensión o intensidad no deseada que se superpone con la señal medida, interfiriendo, por tanto, en el proceso de medición. Se diferencia dos tipos de ruido:

- **Ruido interno o inherente.** Es el ruido generado por el propio dispositivo electrónico usado, siendo de naturaleza aleatoria.
- **Ruido externo o interferencias.** Se genera como consecuencia de un acoplamiento eléctrico o magnético con el propio sistema o con otro sistema. Este tipo de ruido puede ser periódico, intermitente o aleatorio; y normalmente se reduce minimizando el acoplamiento utilizando blindajes o con una reorientación adecuada de los componentes y conexiones.

El ruido se puede tratar de dos formas distintas, bien reduciendo el ruido en sus fuentes y propagación, o bien filtrando la señal obtenida.

Pero en la práctica, ¿qué es el ruido? Observando la Ilustración 7-9 y la Ilustración 7-10 es muy fácil de entender qué es ruido y por qué es un problema. Puede decirse que el ruido es “grosor o ancho” de la curva que representa la señal. Por tanto, a mayor grosor habrá más valores de resistencia para un mismo tiempo, y en consecuencia, mayor error. Se ve como la Ilustración 7-9 corresponde a una señal con poco ruido (ese grosor es de aproximadamente  $0.03 \cdot 10^5 \Omega$ ), mientras que la señal de la Ilustración 7-10 presenta mucho ruido (el grosor es de  $0.25 \cdot 10^5 \Omega$ ).

**Memoria**

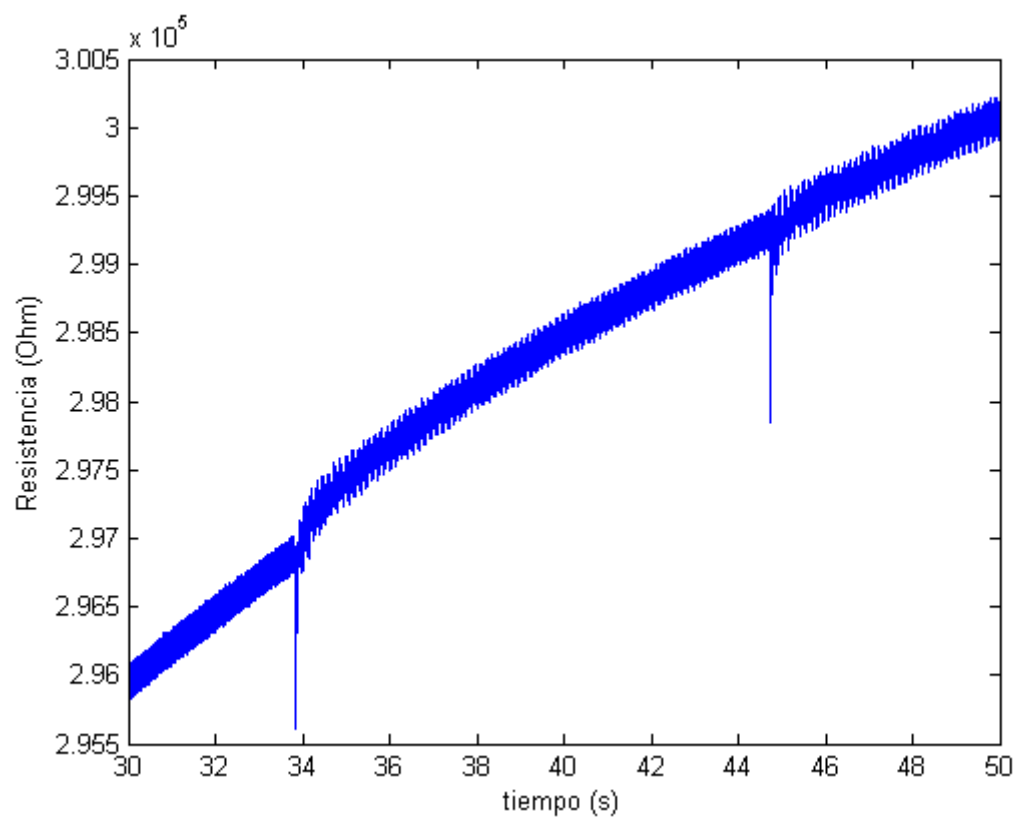


Ilustración 7-9 Señal con poco ruido

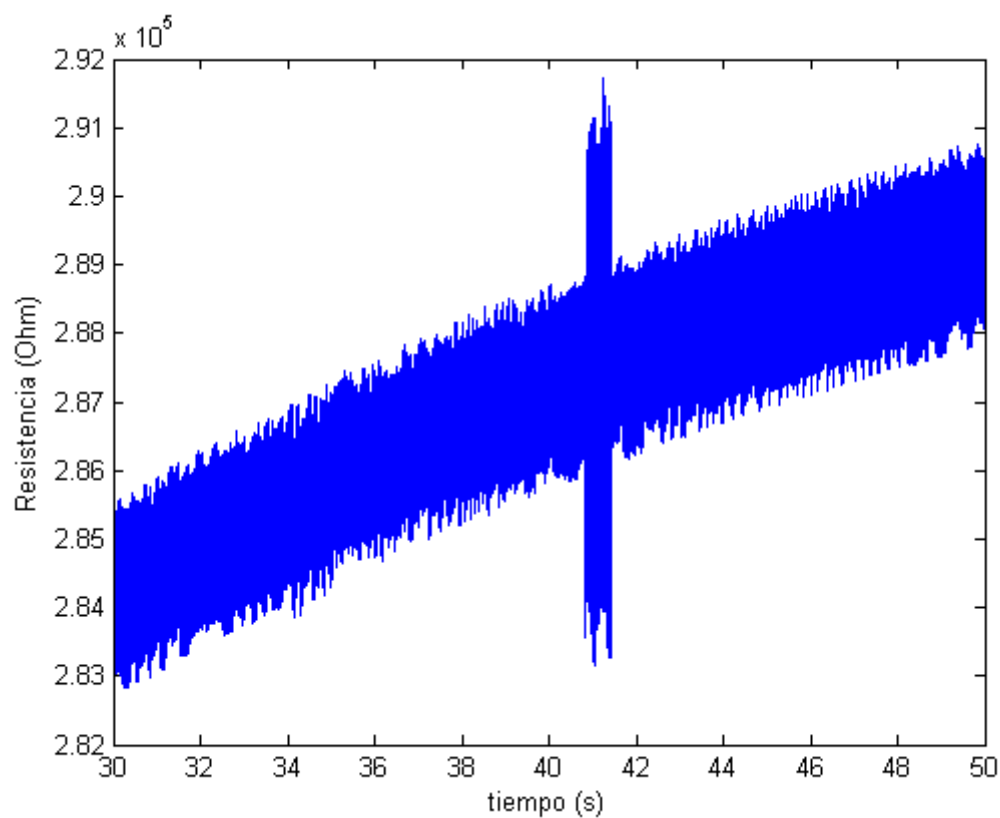


Ilustración 7-10 Señal con mucho ruido



## Memoria

Para el presente TFG se ha llevado a cabo varios ensayos con el objetivo de reducir el ruido, detallados en los apartados 7.2.1 y 7.2.2. En los citados ensayos se ha usado un sensor cedido por Perugia, y nos los resultantes de las amasadas realizadas.

### 7.2.1 Sistemas de alimentación eléctrica y sus implicaciones

Se ha comparado el ruido de la señal utilizando dos fuentes de alimentación distintas, como son la red eléctrica del propio taller (cuya frecuencia es de 50 Hz) y un pequeño generador eléctrico portátil (Ilustración 7-11 Generador eléctrico).



Ilustración 7-11 Generador eléctrico

Para la realización del ensayo se ha utilizado la conexión Tipo 2 (consultar apartado 4.1) con clemas. A continuación se aplicó una precarga de unos 100 kg (indicada en cada ensayo) y se golpeó tres veces la viga ligeramente con una maza de goma a unos 50 cm del centro de vano.

En el caso de la red eléctrica se obtuvieron las señales de la Ilustración 7-12, Ilustración 7-13 y Ilustración 7-14.

**Memoria**

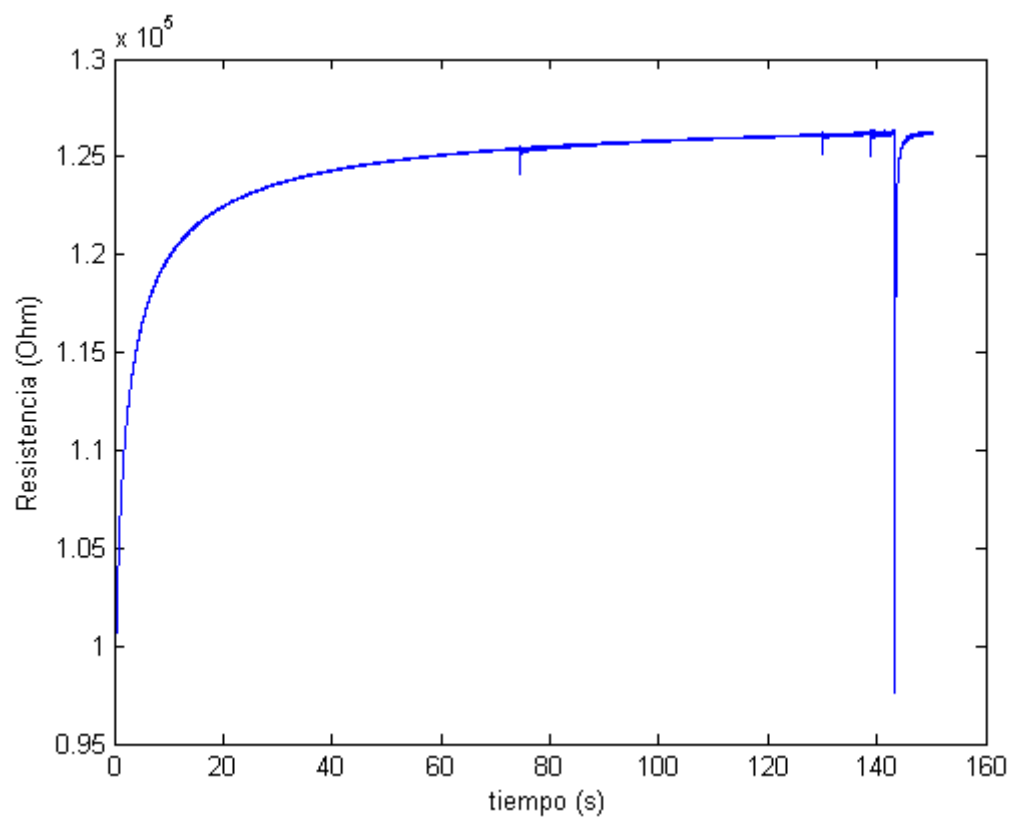


Ilustración 7-12 Curva de resistencia con red eléctrica y conexión Tipo 2

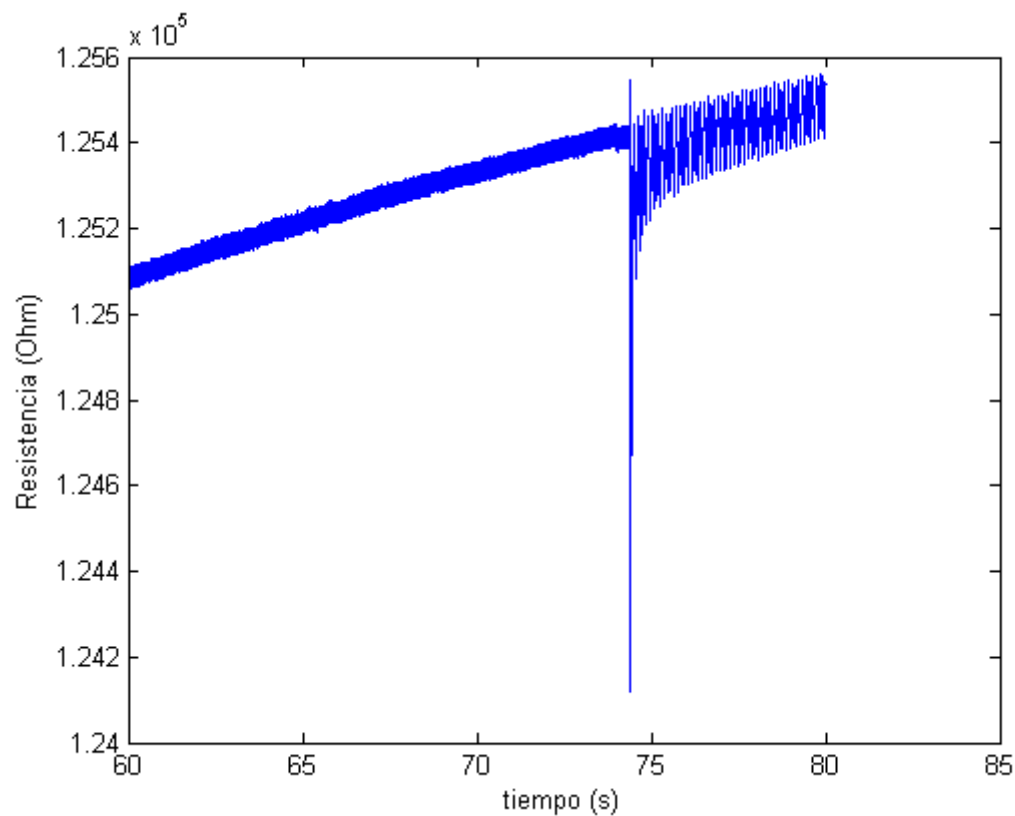
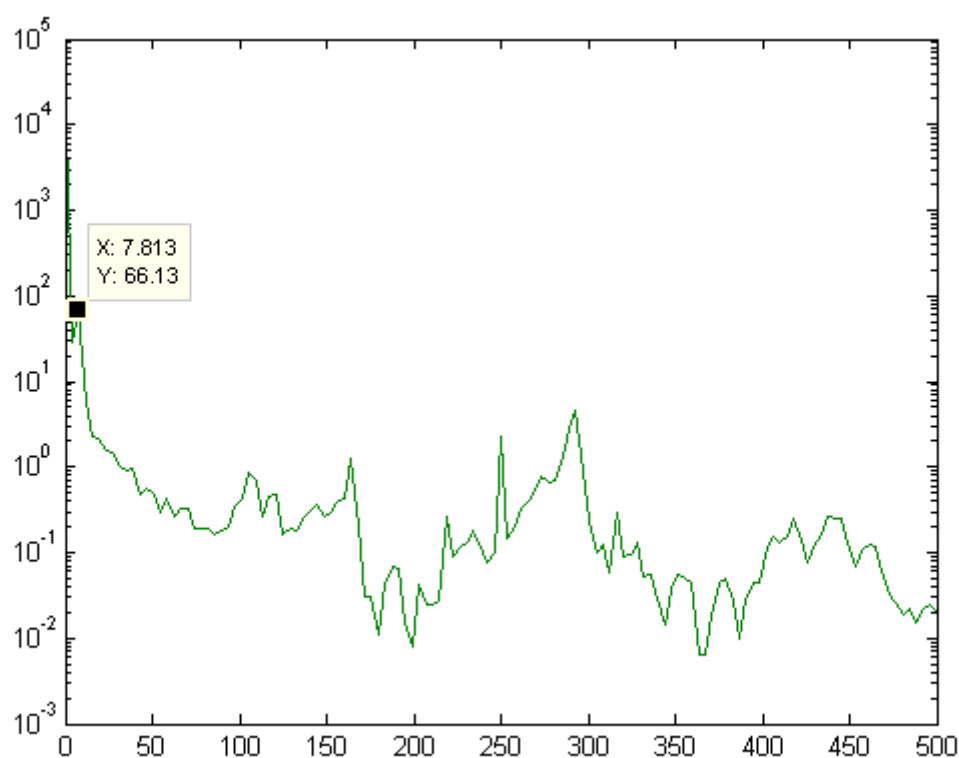


Ilustración 7-13 Zoom de la curva de la Ilustración 7-12

**Memoria**



**Ilustración 7-14 FFT de la curva de la Ilustración 7-12**

Igualmente, con el generador, los resultados son los correspondiente a la Ilustración 7-15, Ilustración 7-16 e Ilustración 7-17.

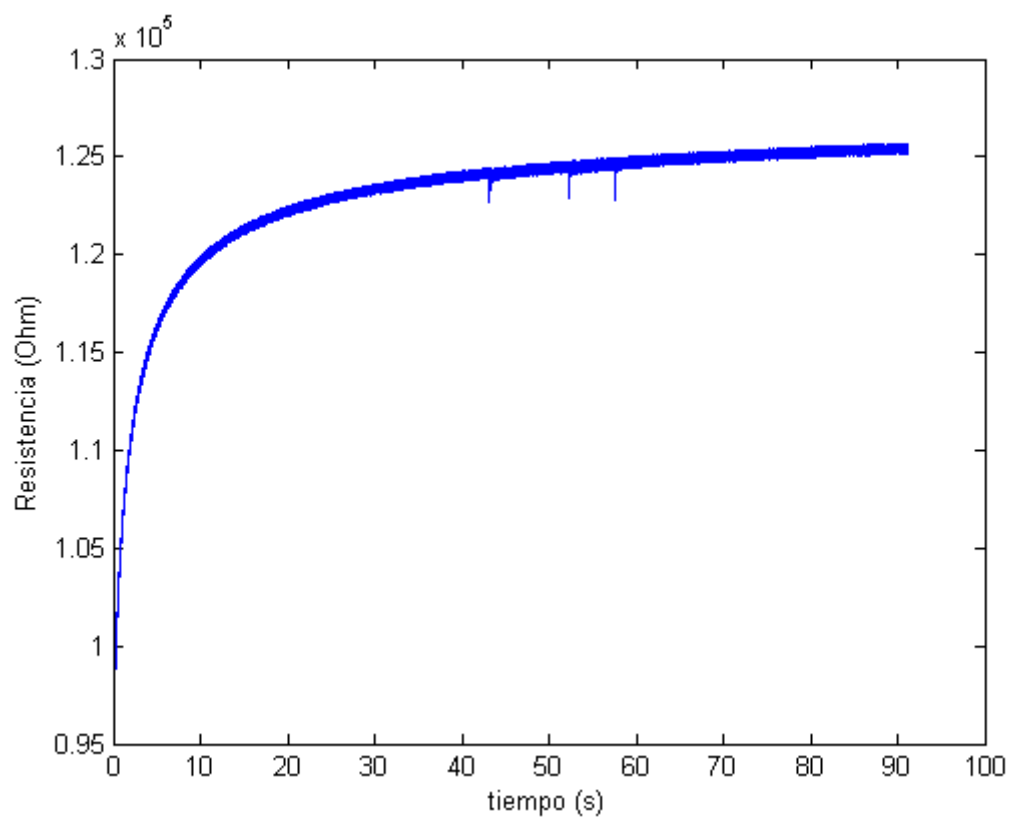


Ilustración 7-15 Curva de resistencia con el generador y conexión Tipo 2

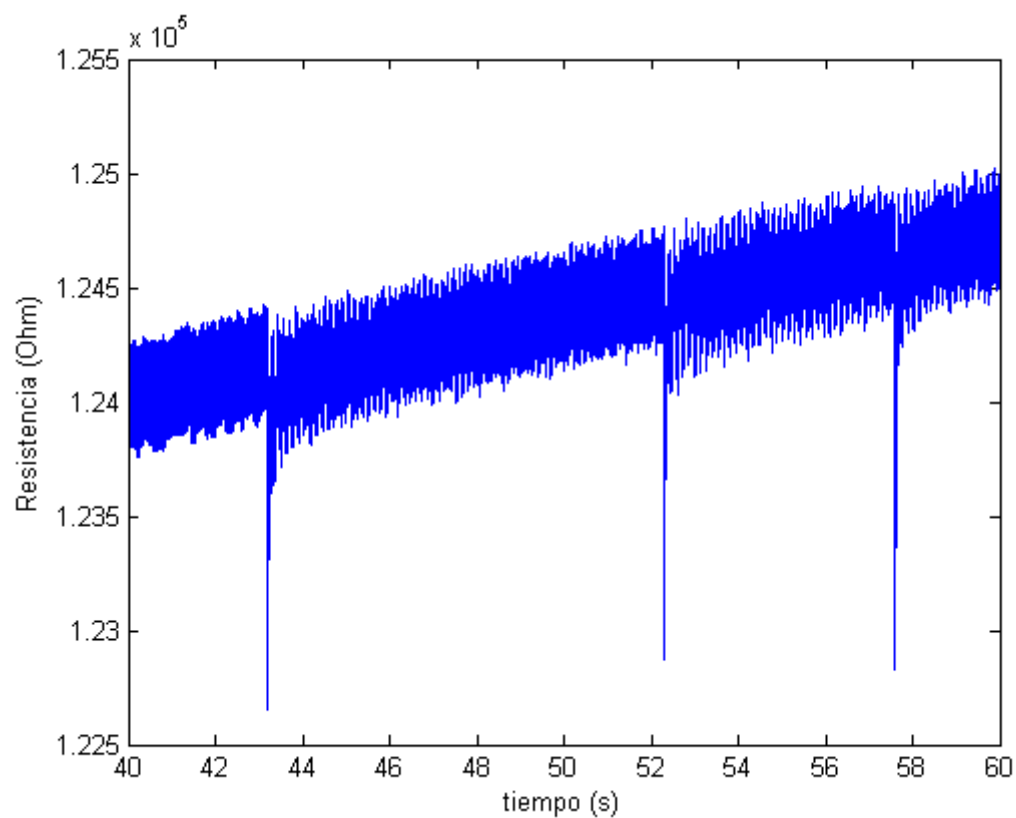


Ilustración 7-16 Zoom de la curva de la Ilustración 7-15

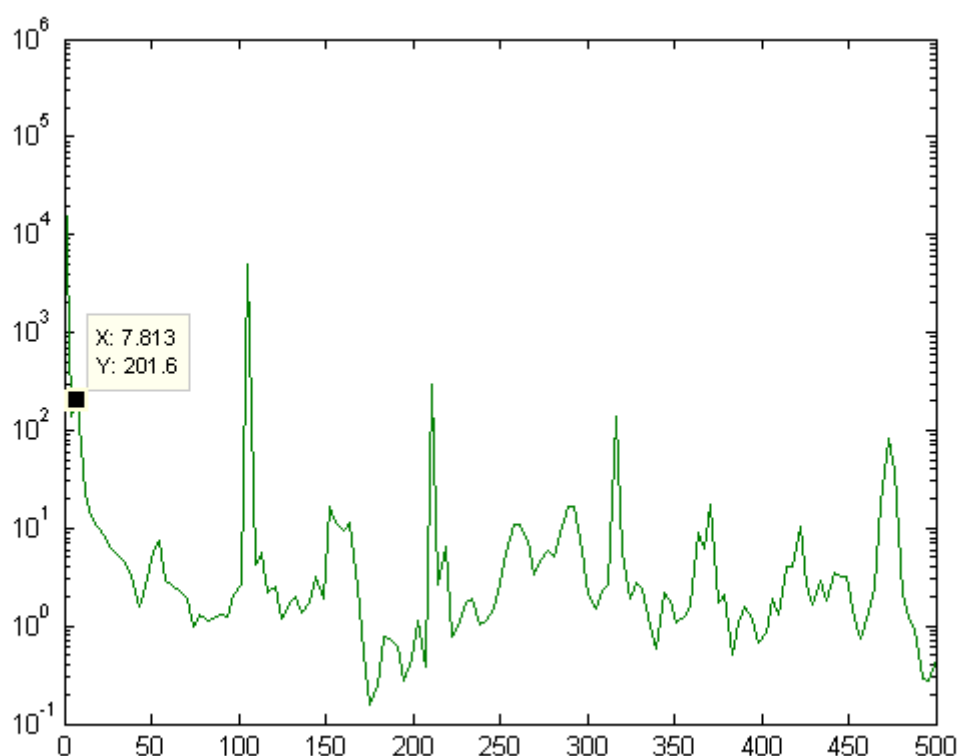


Ilustración 7-17 FFT de la curva de Ilustración 7-15

En vista a los resultados puede afirmarse de que el ruido es mucho menor usando la red eléctrica convencional como fuente de alimentación, ya que con ella tenemos un ancho de apenas  $0.01 \cdot 10^5 \Omega$ , mientras que con el generador es 5 veces mayor. Además, la FFT también es más limpia, identificándose correctamente la frecuencia propia de la viga. Aún así, el ruido de la señal correspondiente al generador no es alarmante.

Sin embargo, de cara a una aplicación práctica sí que es un problema, ya que en la mayoría de los casos no se tendrá acceso a la red eléctrica convencional para realizar las mediciones, y será necesario el uso de un equipo generador.

### 7.2.2 Caracterización y eliminación del ruido eléctrico durante la medición

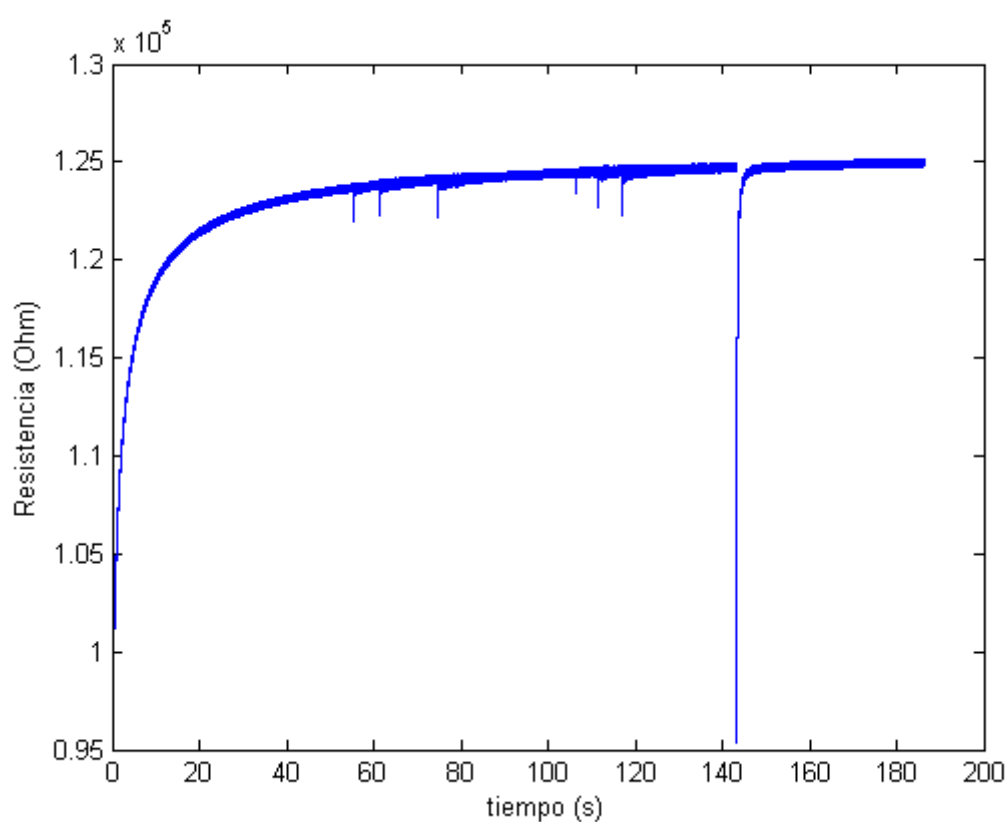
En presente apartado se analizará tres formas de eliminar el ruido. Estas son la introducción de un filtro físico compuesto por una serie de condensadores a la salida de la fuente de alimentación, utilizar conexión Tipo 1 o Tipo 2, y por último utilizar un filtro para el tratamiento de datos en MatLab que elimina el ruido teniendo en cuenta la frecuencia de 50 Hz de la red como el teorema de Nyquist.

Para el ensayo se ha procedido exactamente igual a lo descrito en el apartado 7.2.1.

### **7.2.2.1 Filtro físico compuesto por condensadores**

Para estudiar los resultados del filtro físico se ha utilizado como fuente de alimentación el generador, y la conexión Tipo 2 mediante clemas.

Los resultados sin el filtro son los de la Ilustración 7-15, Ilustración 7-16 y Ilustración 7-17 del apartado 7.2.1. En la Ilustración 7-18, Ilustración 7-19 e Ilustración 7-20 se encuentran los resultados usando el filtro.



**Ilustración 7-18** Curva de resistencia usando el generador y el filtro físico con conexión Tipo 2



**Memoria**

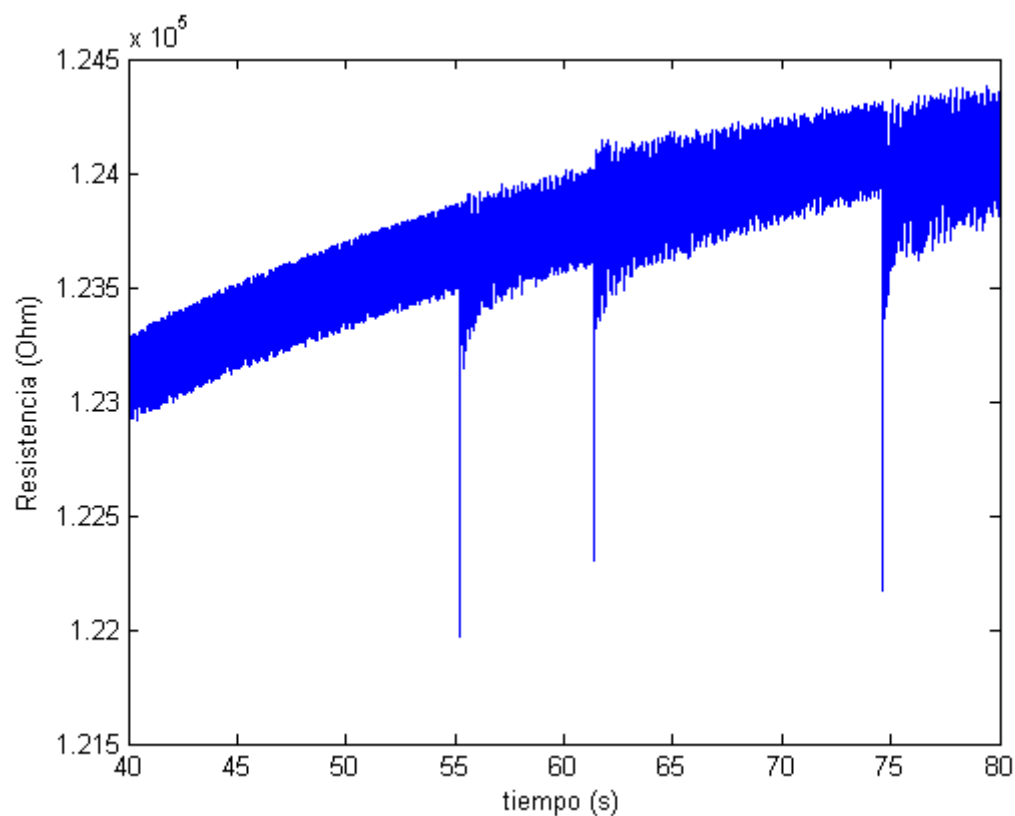


Ilustración 7-19 Zoom de la curva de la Ilustración 7-18

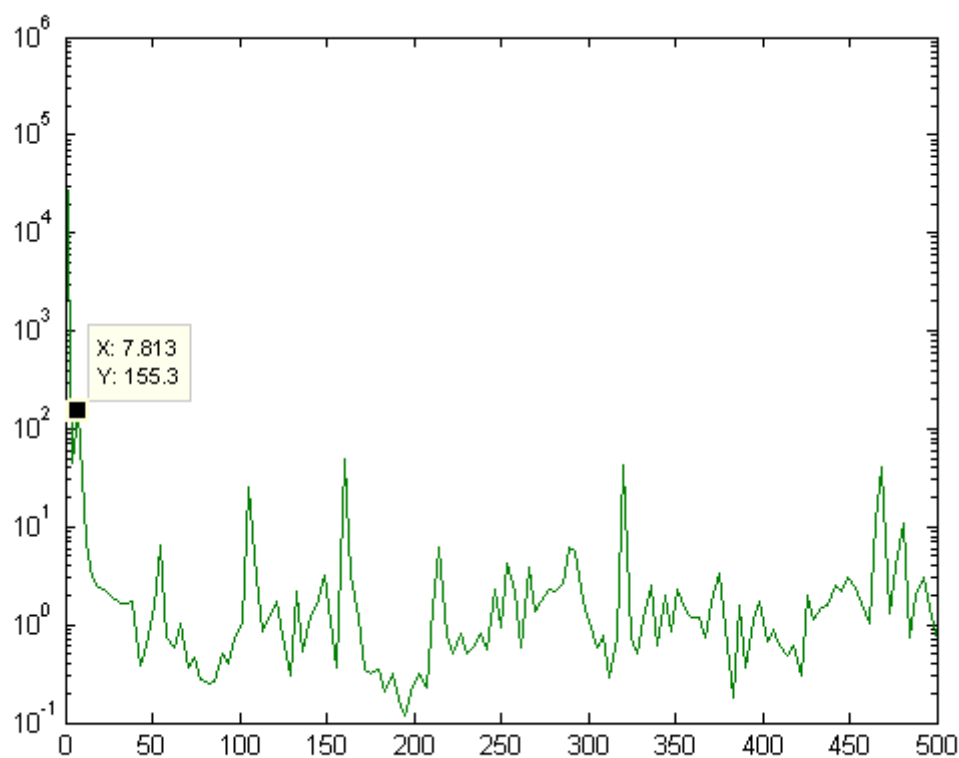


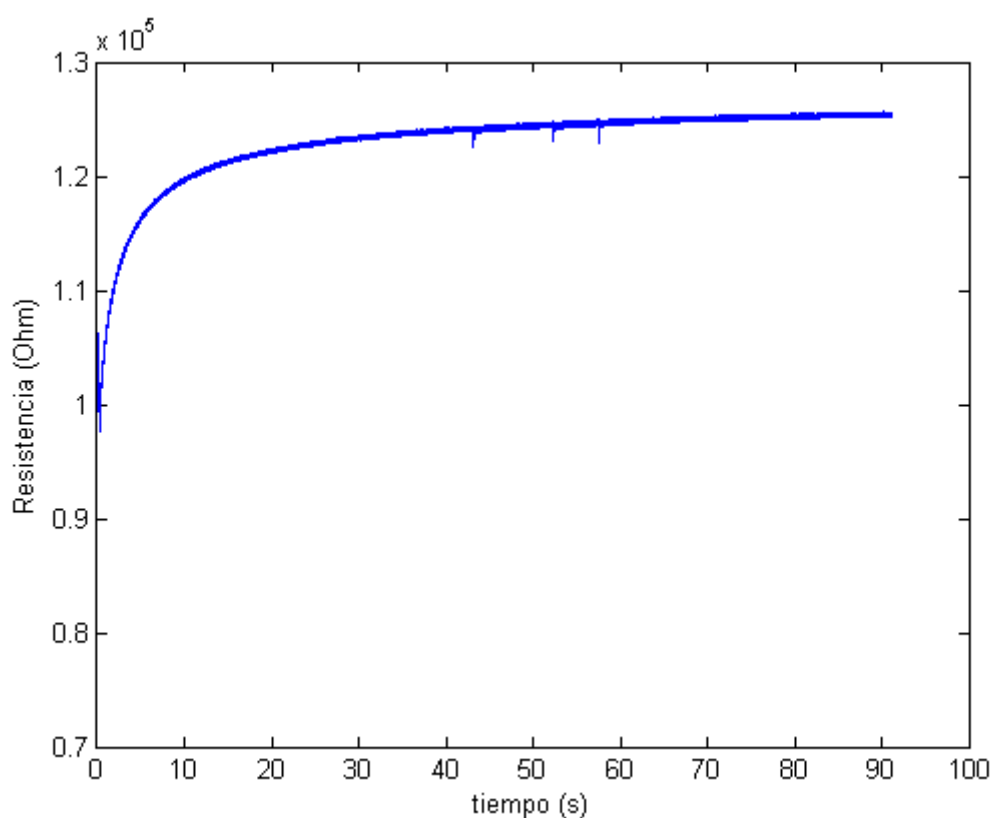
Ilustración 7-20 FFT de la curva de la Ilustración 7-18

Observando los resultados puede verse que con el filtro físico el ruido es ligeramente inferior, de  $0.004 \cdot 10^5 \Omega$  el frente a  $0.005 \cdot 10^5 \Omega$ . Por tanto, se puede decir que el filtro no influye, o al menos, de forma notable.

### 7.2.2.2 Filtro informático

Para estudiar los resultados del filtro físico se ha utilizado como fuente de alimentación el generador, y la conexión Tipo 2 mediante clemas.

Los resultados sin el filtro son los de la Ilustración 7-15, Ilustración 7-16 y Ilustración 7-17 del apartado 7.2.1. Cuando se filtran los datos se obtienen los resultados de la Ilustración 7-21, Ilustración 7-22 e Ilustración 7-23.



**Ilustración 7-21** Curva de resistencia con el generador eléctrico y el filtro informático, usando conexión Tipo 2

**Memoria**

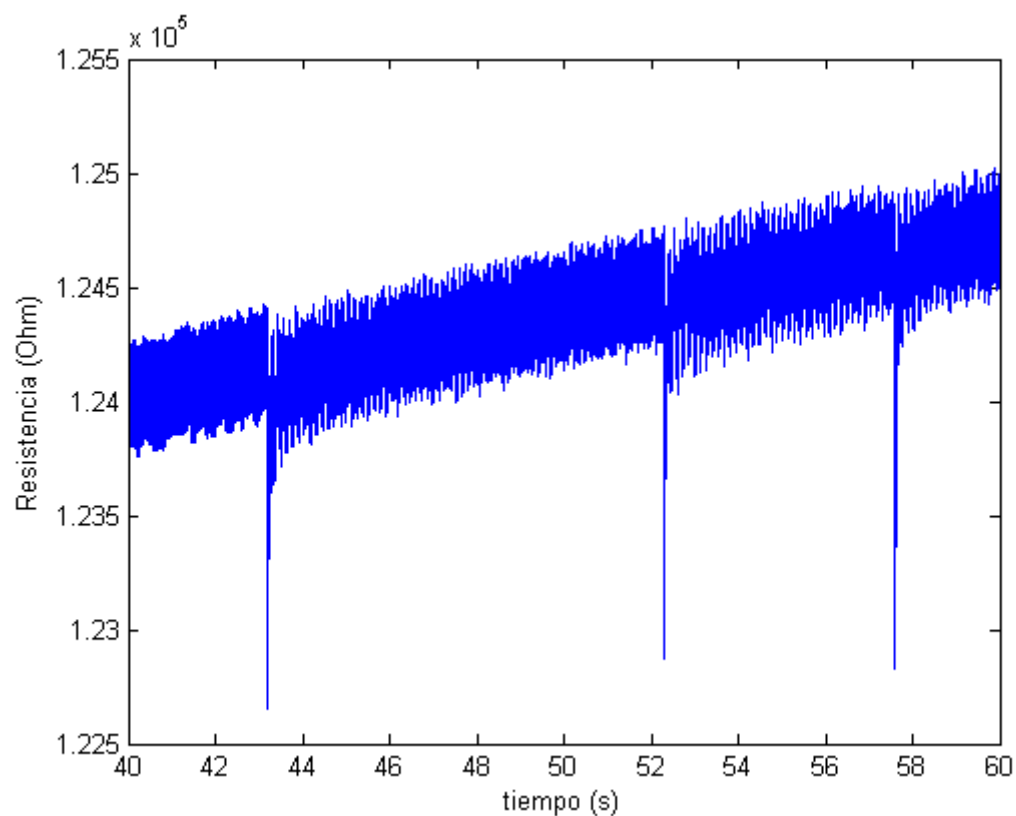


Ilustración 7-22 Zoom de la curva de la Ilustración 7-21

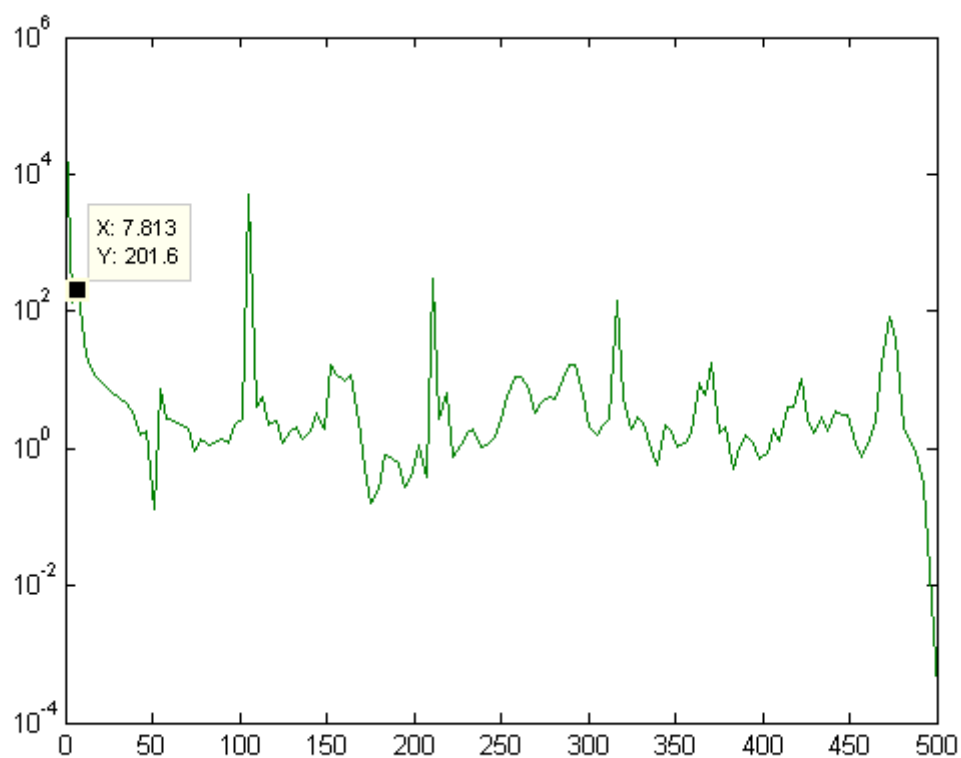


Ilustración 7-23 FFT de la curva de la Ilustración 7-21

No se aprecia ninguna mejora en términos de reducción del ruido, incluso podría decirse que la sensibilidad ha disminuido ligeramente.

### 7.2.2.3 Tipo de conexión

Para el tipo de conexión se comparará el ruido obtenido usando la conexión Tipo 1 con la Tipo 2. En Ilustración 7-15, Ilustración 7-16 e Ilustración 7-17 se puede ver las curvas obtenidas usando el generador y la conexión Tipo 2. La Ilustración 7-24, Ilustración 7-25 e Ilustración 7-26 corresponden a la Tipo 1.

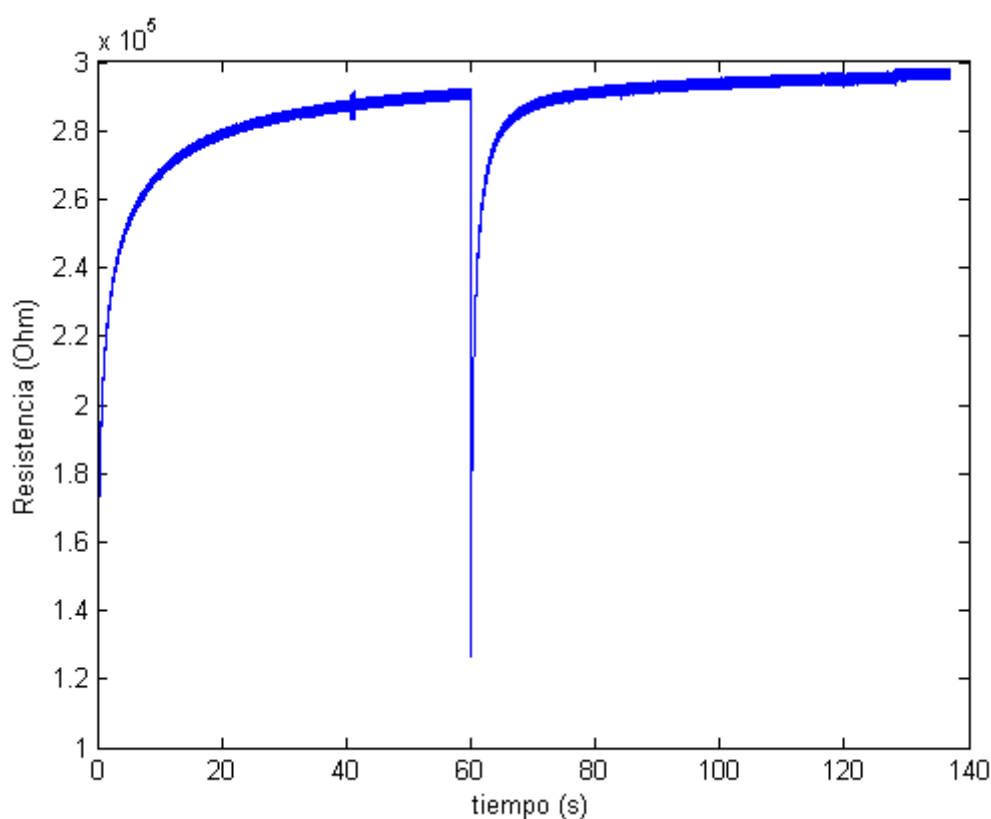


Ilustración 7-24 Curva de resistencia con red eléctrica y conexión Tipo 1

**Memoria**

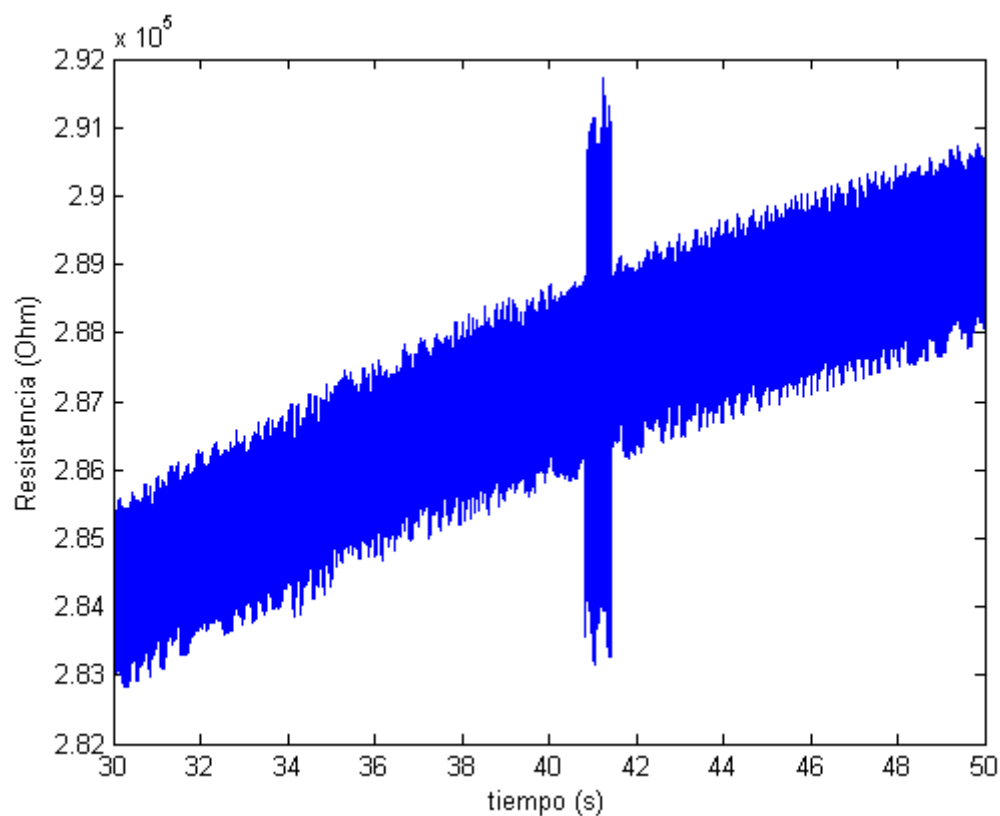


Ilustración 7-25 Zoom de la curva de la Ilustración 7-24

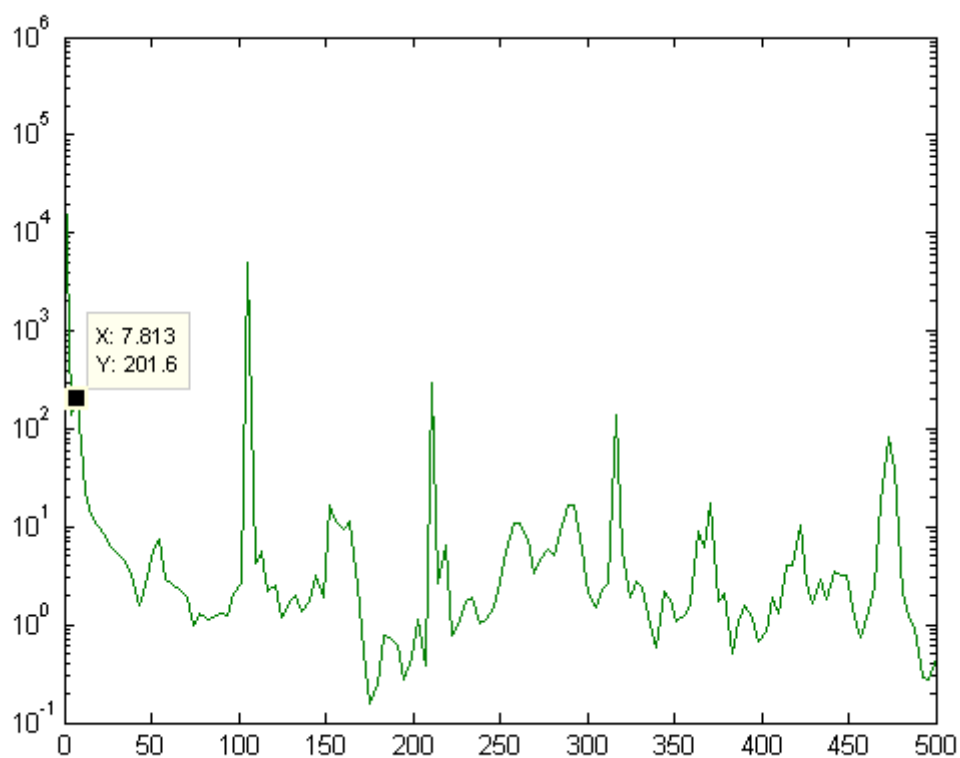


Ilustración 7-26 FFT de la curva de la Ilustración 7-24

## **Memoria**

En vista a los resultados, la conexión Tipo 1 resulta claramente menos favorecedora, ya que, por un lado la sensibilidad es casi nula, y por otro aumenta el ruido de  $0.005 \cdot 10^5 \Omega$  a  $0.020 \cdot 10^5 \Omega$ .

### **7.2.3 Conclusiones sobre la eliminación del ruido eléctrico**

Después de analizar todos los datos de los diferentes ensayos y pruebas realizadas se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- El filtro físico constituido por condensadores no influye, y si lo hace, es inapreciable.
- La conexión Tipo 2 es muy superior a la Tipo 1, ya que ofrece una sensibilidad muy superior y menos ruido.
- Con la red eléctrica hay menos ruido que con el generador, pero la diferencia es muy pequeña, y en ningún caso determinante.
- La sensibilidad en la red y en el generador es similar a igualdad de tipo de conexión.

Remarcar que todas estas pruebas se han realizado a un solo sensor cedido por Perugia, por lo que su repetibilidad no está asegurada, y por tanto, estas conclusiones no son más hipótesis sin validar.

### **7.3 Correlación teórico-experimental**

Con la lectura de los apartados 7.1 y 7.2 se puede formular una idea general del ensayo para determinar la frecuencia propia de la viga biapoyada en cuestión.

Mediante la Ecuación 7-4 se ha determinado teóricamente dicha frecuencia, obteniendo un valor de 7.8107Hz. Así, la determinada experimentalmente debe ser similar.

Recordar al lector que el ensayo consistía en aplicar una precarga de unos 100 kg al sensor para cerrar las grietas y asegurar que siempre trabaje a compresión durante la oscilación del perfil. Después se golpeó la viga tres veces con una maza de goma.

Se tomará los datos obtenidos usando el generador y la conexión Tipo 2 para realizar varios apuntes sobre la metodología del ensayo.

En la Ilustración 7-27 se puede apreciar tres picos en la curva de resistencia, correspondiéndose cada uno de ellos a un golpe. Si en la zona de los golpes se realiza una FFT se obtienen los resultados de la Ilustración 7-17. En ella se puede apreciar el pico correspondiente a la frecuencia propia, el cual arroja un valor de 7.813 Hz, casi idéntico al calculado teóricamente. Sin embargo,



aparecen otros muchos picos. Estos pueden deberse a los demás modos de vibración de la viga, o al ruido de la propia señal.

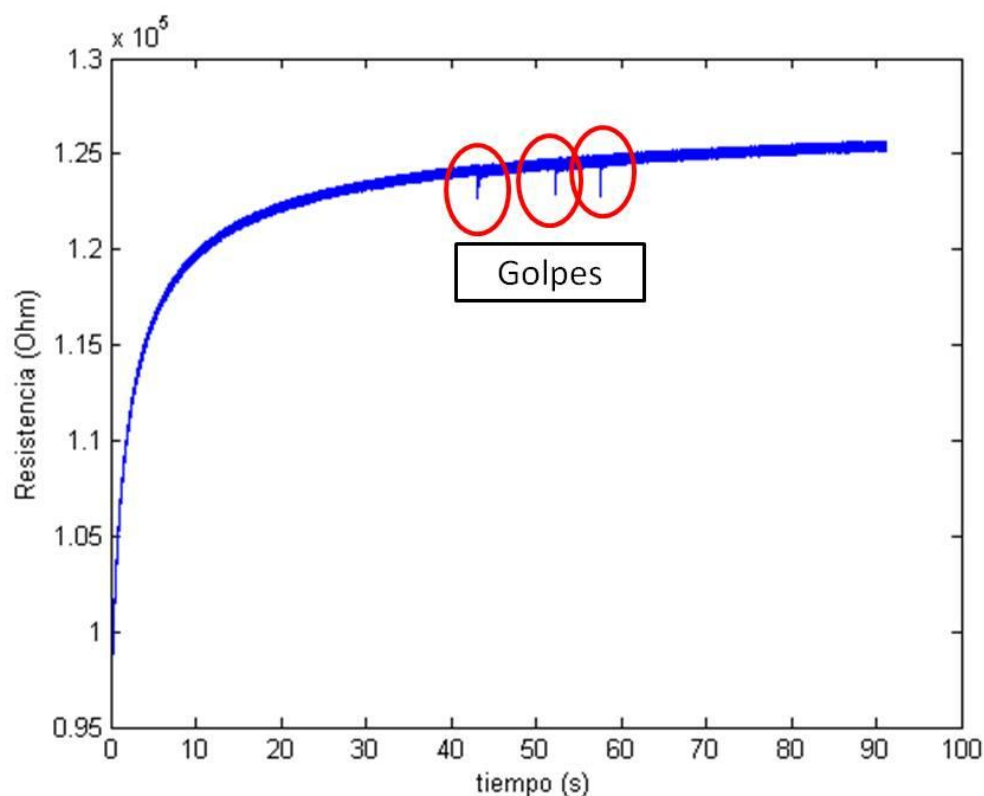


Ilustración 7-27 Detección de los golpes

#### 7.4 Caracterización de los sensores según tipo de conexión

Se ha llevado a cabo una campaña de ensayos con los sensores fabricados en las amasadas nº 2, nº 3 y nº 4 con el objetivo de comprobar la influencia del tipo de conexión tanto en la disminución del ruido como en la sensibilidad del sensor.

Para que todos los golpes sean iguales se ha dejado caer una bola de acero (Ilustración 7-28) de 94.9 g desde 205 cm de altura con la ayuda de un tubo de PVC, tal y como se muestra en la Ilustración 7-29.

## Memoria



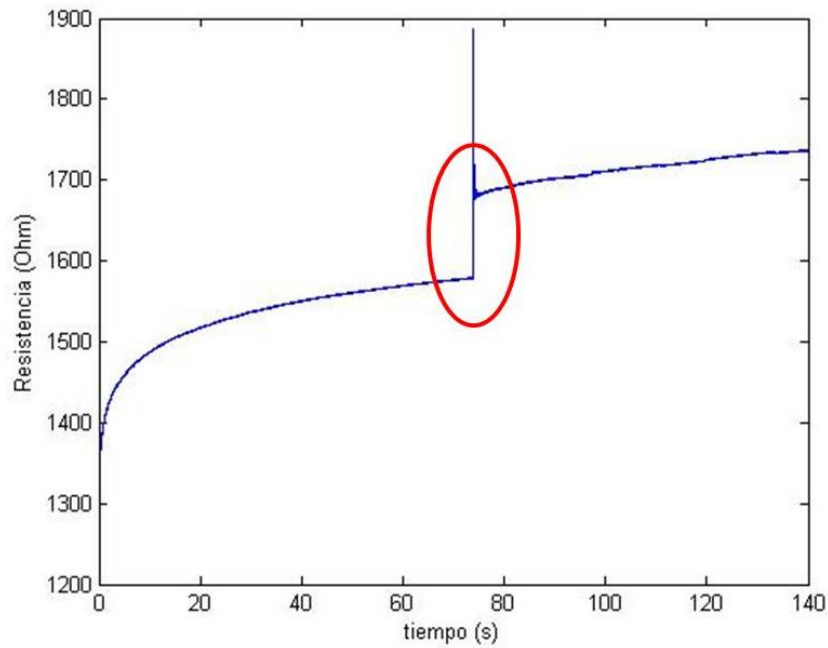
Ilustración 7-28 Bola de acero



Ilustración 7-29 Montaje para dar los golpes con la bola de acero

Los resultados del ensayo pueden consultarse en el Anexo D. En concreto se encuentra, para cada tipo de conexión, una gráfica con la evolución de la resistencia, otra con el detalle en el momento del golpe, y la FFT. El salto de en las gráficas de resistencia, marcado en la Ilustración 7-30, se debe a que justo en el momento del golpe el tornillo se ha aflojado, bajando súbitamente la precarga de compresión, y por tanto, se produce un incremento en la resistencia.

**Memoria**



**Ilustración 7-30 Cambio brusco en la resistencia**

Tras analizar los resultados del Anexo D se llega a dos conclusiones:

- El comportamiento tanto en términos de sensibilidad como de ruido es similar con ambos tipos de conexiones. Bien es cierto que con la Tipo 2 el “grosor” de la señal es menor, pero también lo son los valores de resistencia medidos, es decir, hay una proporcionalidad.
- Los sensores de la amasada nº 4, con un contenido de CNTs del 0.50 % presenta una sensibilidad pésima. Esta conclusión está en la línea a la que se llegó en el apartado 6.2.4.

**Memoria**

## **8 CONCLUSIONES**

**Memoria**

## **9 LÍNEAS FUTURAS**



**Memoria**

## 10 REFERENCIAS

ARKEMA. (08 de 2013). Ficha Técnica Graphistrength CW2-45. *Ficha Técnica Graphistrength CW2-45*.

AUXILAB S.L. (2 de septiembre de 2014). Manual de Instrucciones Agitador Magnético nahita blue 682-692-692/1. *Manual de Instruccioni*. Beriain, Navarra, España.

BASF Construction Chemicals España, S.L. (22 de 02 de 2016). Ficha Técnica MasterEase 3850. *Ficha Técnica MasterEase 3850*.

CONTROLS-GROUP. (s.f.). *Controls - Group*. Recuperado el 22 de 04 de 2017, de Digital mortar mixes: [http://www.controls-group.com/eng/scheda-print.php?id\\_cat=cement&id\\_prod=digital-mortar-mixers](http://www.controls-group.com/eng/scheda-print.php?id_cat=cement&id_prod=digital-mortar-mixers)

D'Alessandro, A., Rallini, M., Ubertini, F., Materazzi, A., & Kenny, J. (2015). Investigations on scalable fabrication procedures for self-sensing carbon nanotube cement-matrix composite for SHM applications. *ELSEVIER*, 200-213.

Drake Moyano, J. M. (2005). *Instrumentación Electrónica de Comunicaciones*. Apuntes 5º Curso Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad de Cantabria, Dpto. de Electrónica y Computadores, Santander.

FYM Italcementi Group. (s.f.). Ficha Técnica i.pro ULTRA 42.5 R/SR. *Ficha Técnica i.pro ULTRA 42.5 R/SR*.

Genovés Gómez, V. *TFG. Morteros y hormigones con adición de nanotubos de carbono*. Universidad Politécnica de Valencia.

Hielscher Ultrasonics GmbH. (2017). *Hielscher Cavitación ultrasónica en líquidos*. Recuperado el 09 de 04 de 2017, de <https://www.hielscher.com/es/cavitat.htm>

Hielscher Ultrasonics GmbH. (2017). *Hielscher Dispersión y desaglomeración por ultrasonidos*. Recuperado el 09 de 04 de 2017, de <https://www.hielscher.com/es/disperse.htm>

Hielscher Ultrasonics GmbH. (2017). *Hielscher Sonotrodos ultrasónicos, reactores de flujo y accesorios*. Recuperado el 09 de 04 de 2017, de <https://www.hielscher.com/es/ultrasonic-sonotrodes-flow-cells-accessories.htm>

Hielscher Ultrasonics GmbH. (2017). *Hielscher UIP1000hdT*. Recuperado el 09 de 04 de 2017, de [https://www.hielscher.com/es/ui1000\\_p.htm](https://www.hielscher.com/es/ui1000_p.htm)

Magato Suárez, F., Tremps Guerra, E., Maganto Suárez, F., García García, A., Somolinos Sánchez, J. A., González Redondo, M. M., y otros. (2010). Estudio

**Memoria**

de la frecuencia de vibración en vigas. *II Congreso Nacional de Investigación en Edificación*. Madrid.

Marcondes, C., Medeiros, M., Marques Filho, J., & Helene, P. (2015). Nanotubos de carbono en concreto de cemento Portland. Influencia de la dispersión en las propiedades mecánicas y en la absorción de agua. *ALCONPAT*, 5 (2).

Materazzi, A. L., Ubertini, F., & D'Alessandro, A. (2013). Carbon nanotube cement-based transducers for dynamic sensing os strain. *ELSEVIER*, 2-11.

NATIONAL INSTRUMENTS. (s.f.). *sine.ni.com*. Recuperado el 22 de mayo de 2017, de NI PXIe-1073: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/207401>

NATIONAL INSTRUMENTS. (s.f.). *sine.ni.com*. Recuperado el 22 de mayo de 2017, de PXI-4171: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/14857>

NATIONALS INSTRUMENTS. (s.f.). *sine.ni.com*. Recuperado el 22 de mayo de 2017, de NI PXI-4130: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/204239>

Osuna Toro, A. M. (2013). *Un acercamiento a la dinámica experimental en medios continuos mediante PULSE LabShop: Aplicación a sistemas de 1 y 2 gdl y a la caracterización de materiales*. Proyecto Final de Carrera, Málaga.

Peláez Lodoño, J. (2009). *Nanotubos y nanodrive: adiós silicio, hola nanotecnología*. Santa Fe, Argentina: El Cid Editor.

SERVOSIS. (s.f.). Máquinas para ensayos de tracción/compresión/flexión 0.1-50 T - SERIE ME-405. *Catálogo comercial/técnico*.

Suslick, K. (1998). *Enciclopedia Kirt-Othmer de tecnología química*. Nueva York: Jonh Wiley & Sons.

Ubertini, F., & D'Alessandro, A. (2016). *Research Work: "Developement and Testing of Innovate piezoresistive Nanocomposite Cement-based Materials"*. University of Perugia, Perugia.

Ubertini, F., Laflamme, S., Ceylan, H., Materazzi, A. L., Cerni, G., Saleem, H., y otros. (2014). Novel nanocomposite technologies for dynamic monitoring of structures: a comparison between cement-based embeddable and soft elastomeric surface sensors. *IOPscience*.

Ubertini, F., Materazzi, A. L., D'Alessandro, A., & Laflamme, S. (2014). Natural frecuencies identification of a reinforced concrete beam using carbon cement-based sensors. *ELSEVIER*, 265-275.

Wikipedia. (s.f.). *Wikipedia*. Recuperado el 09 de 04 de 2017, de <https://es.wikipedia.org/wiki/Nanotubo>

**Memoria**



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**EPS**

Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Málaga

# TRABAJO FIN DE GRADO

## ANEXOS

***“Caracterización y fabricación de sensores de cemento con nanotubos de carbono (CNTs)”***

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: JOSÉ LUIS GÓMEZ RODA

Tutor: GERMÁN CASTILLO LÓPEZ

Cotutor: FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ

junio de 2.017



**Anexos**

**ÍNDICE ANEXOS**

**ANEXO A. HOJAS DE MEZCLAS**

**ANEXO B. PLANOS MOLDE**

**ANEXO C. GUÍA RÁPIDA PARA USAR EL PROGRAMA DE LABVIEW**

**ANEXO D. RESULTADOS ENSAYO ESTÁTICO CON CARGA**

**ANEXO E. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES SEGÚN EL TIPO DE CONEXIÓN**

**ANEXO F. FICHAS TÉCNICAS DE MATERIALES**

**ANEXO G. EQUIPOS UTILIZADOS**





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**EPS**

Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Málaga

# TRABAJO FIN DE GRADO

**ANEXO A. Hojas de Mezclas**

***“Caracterización y fabricación de sensores de cemento con nanotubos de carbono (CNTs)”***

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: JOSÉ LUIS GÓMEZ RODA

Tutor: GERMÁN CASTILLO LÓPEZ

Cotutor: FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ

junio de 2.017



**Anexo A. Hojas de Mezclas**

**ÍNDICE ANEXO A. Hojas de Mezclas**

1	1.00_CNTS_1
2	1.00_CNTS_2
3	1.50_CNTS_3
4	0.50_CNTS_4
5	1.00_CNTS_5
6	1.00_CNTS_AGUAGRIFO_6
7	0.25_CNTS_7
8	0.75_CNTS_8
9	1.00_CNTS_AGUAGRIFO_9
10	SONICACIÓN 1%CNTS
11	SONICACIÓN 2%CNTS



## HOJA DE MEZCLAS

Referencia: **1.00\_CNTs\_1**

Fecha: 13/03/2017

Dosificación para 1 m3 de mezcla		
	kg	%
Cemento	1277	-
Agua	575	45
Plastificante	12,77	1
MWCNTs	12,77	1

Datos sensores		
lado del cubo	51	mm
nº sensores	1,4	
volumen total	0,00018571	m3

Cantidad para	1,4	sensores
	gr	%
Cemento	237	-
Agua	107	45
Plastificante	2	1
Pelles	5,3	2,2
(MWCNT)	2,4	1
(CMC)	2,9	1,2

Datos PELLETS	% masa
MWCNT	45
CMC	55

Pérdidas (%)	10
--------------	----

Dosificación total con pérdidas		
	gr	%
Cemento	261	-
Agua	117	45
Plastificante	3	1
Pelles	5,8	2,2
(MWCNT)	2,6	1
(CMC)	3,2	1,2

Dosificación real empleada		
	gr	%
Cemento	261	-
Agua	141	54,0
Plastificante	0	0,0
Pelles	5,8	2,2
(MWCNT)	2,6	1,0
(CMC)	3,2	1,2

### Observaciones:

Mezcla correspondiente al sensor de prueba en el molde de madera.

Se añadió más agua a la mezcla para mejorar la trabajabilidad sin emplear plastificante.

Presenta una trabajabilidad bastante aceptable.

14/03 10:15 -> Aún sigue fresca la mezcla tras 22 horas.

17/03 18:30 -> Se desmoldó. El sensor se desmenuzaba y estaba roto. Color muy negro.

21/03 12:30 -> Ya no se hunden las esquinas al presionarlo con los dedos

\*Rellenar solamente las celdas sombreadas en amarillo

\*\*Formato de referencia: porcentaje de CNTs (X.XX)\_CNTs\_número de amasada



## HOJA DE MEZCLAS

Referencia: **1.00\_CNTs\_2**

Fecha: 07/04/2017

Dosificación para 1 m3 de mezcla		
	kg	%
Cemento	1277	-
Agua	575	45
Plastificante	12,77	1
MWCNTs	12,77	1

Datos sensores		
lado del cubo	51	mm
nº sensores	11	
volumen total	0,00145916	m3

Cantidad para	11	sensores
	gr	%
Cemento	1863	-
Agua	839	45
Plastificante	19	1
Pelles	41,4	2,2
(MWCNT)	18,6	1
(CMC)	22,8	1,2

Datos PELLETS	% masa
MWCNT	45
CMC	55

Pérdidas (%)	15
--------------	----

Dosificación total con pérdidas		
	gr	%
Cemento	2143	-
Agua	964	45
Plastificante	21	1
Pelles	47,6	2,2
(MWCNT)	21,4	1
(CMC)	26,2	1,2

Dosificación real empleada		
	gr	%
Cemento	2143	-
Agua	964	45,0
Plastificante	33	1,5
Pelles	47,6	2,2
(MWCNT)	21,4	1,0
(CMC)	26,2	1,2

### Observaciones:

- SONICACIÓN: P=30%; A=84%; t=30 min; sin registro de temp; temp\_final= 55°C aprox.
- AGITADOR MAGNÉTICO: 961 rpm
- Pérdidas de agua en la sonicación: 12,6 g
- El plastificante se añadió durante el amasado. No se enfrió posteriormente la sonicación.
- MOLDE Nº 1

\*Rellenar solamente las celdas sombreadas en amarillo

\*\*Formato de referencia: porcentaje de CNTs (X.XX)\_CNTs\_número de amasada



## HOJA DE MEZCLAS

Referencia: **1.50\_CNTs\_3**

Fecha: 07/04/2017

Dosificación para 1 m3 de mezcla		
	kg	%
Cemento	1277	-
Agua	575	45
Plastificante	12,77	1
MWCNTs	19,155	1,5

Datos sensores		
lado del cubo	51	mm
nº sensores	11	
volumen total	0,00145916	m3

Cantidad para	11	sensores
	gr	%
Cemento	1863	-
Agua	839	45
Plastificante	19	1
Pelles	62,1	3,3
(MWCNT)	28,0	1,5
(CMC)	34,2	1,8

Datos PELLETS	% masa
MWCNT	45
CMC	55

Pérdidas (%)	15
--------------	----

Dosificación total con pérdidas		
	gr	%
Cemento	2143	-
Agua	964	45
Plastificante	21	1
Pelles	71,4	3,3
(MWCNT)	32,1	1,5
(CMC)	39,3	1,8

Dosificación real empleada		
	gr	%
Cemento	2143	-
Agua	964	45,0
Plastificante	33	1,5
Pelles	71,4	3,3
(MWCNT)	32,1	1,5
(CMC)	39,3	1,8

### Observaciones:

- SONICACIÓN: P=30%; A=84%; t=30 min
- AGITADOR MAGNÉTICO: 961 rpm
- Pérdidas de agua en la sonicación: 9,6 g
- El plastificante se añadió al vaso justo después de sonicar, volviéndose muy viscosa
- Se enfrió después de sonicar hasta una temperatura ambiente.
- MOLDE Nº 3

\*Rellenar solamente las celdas sombreadas en amarillo

\*\*Formato de referencia: porcentaje de CNTs (X.XX)\_CNTs\_número de amasada



## HOJA DE MEZCLAS

Referencia: **0.50\_CNTs\_4**

Fecha: 07/04/2017

Dosificación para 1 m3 de mezcla		
	kg	%
Cemento	1277	-
Agua	575	45
Plastificante	12,77	1
MWCNTs	6,385	0,5

Datos sensores		
lado del cubo	51	mm
nº sensores	11	
volumen total	0,00145916	m3

Cantidad para	11	sensores
	gr	%
Cemento	1863	-
Agua	839	45
Plastificante	19	1
Pelles	20,7	1,1
(MWCNT)	9,3	0,5
(CMC)	11,4	0,6

Datos PELLETS	% masa
MWCNT	45
CMC	55

Pérdidas (%)	15
--------------	----

Dosificación total con pérdidas		
	gr	%
Cemento	2143	-
Agua	964	45
Plastificante	21	1
Pelles	23,8	1,1
(MWCNT)	10,7	0,5
(CMC)	13,1	0,6

Dosificación real empleada		
	gr	%
Cemento	2143	-
Agua	964	45,0
Plastificante	33	1,5
Pelles	23,8	1,1
(MWCNT)	10,7	0,5
(CMC)	13,1	0,6

### Observaciones:

- SONICACIÓN: P=30%; A=84%; t=30 min
- AGITADOR MAGNÉTICO: 1500 rpm
- Pérdidas de agua en la sonicación: 3,9 g
- El plastificante se añadió durante el amasado. Se enfrió la sonicación hasta temp ambiente
- MOLDE Nº 2
- Excelente trabajabilidad

\*Rellenar solamente las celdas sombreadas en amarillo

\*\*Formato de referencia: porcentaje de CNTs (X.XX)\_CNTs\_número de amasada





## HOJA DE MEZCLAS

Referencia: **1.00\_CNTs\_5**

Fecha: 19/05/2017

Dosificación para 1 m3 de mezcla		
	kg	%
Cemento	1277	-
Agua	702	55
Plastificante	6,385	0,5
MWCNTs	12,77	1

Datos sensores		
lado del cubo	63,5	mm
nº sensores	4	
volumen total	0,00102419	m3

Cantidad para 4 sensores		
	gr	%
Cemento	1308	-
Agua	719	55
Plastificante	7	0,5
Pelles	29,1	2,2
(MWCNT)	13,1	1
(CMC)	16,0	1,2

Datos PELLETS	% masa
MWCNT	45
CMC	55

Pérdidas (%)	100
--------------	-----

Dosificación total con pérdidas		
	gr	%
Cemento	2616	-
Agua	1439	55
Plastificante	13	0,5
Pelles	58,1	2,2
(MWCNT)	26,2	1
(CMC)	32,0	1,2

Dosificación real empleada		
	gr	%
Cemento	2616	-
Agua	1439	55,0
Plastificante	13	0,5
Pelles	58,1	2,2
(MWCNT)	26,1	1,0
(CMC)	32,0	1,2

Observaciones:

\*Rellenar solamente las celdas sombreadas en amarillo

\*\*Formato de referencia: porcentaje de CNTs (X.XX)\_CNTs\_número de amasada



## HOJA DE MEZCLAS

Referencia: **1.00\_CNTs\_AguaGrifo\_6**

Fecha: 09/05/2017

Dosificación para 1 m3 de mezcla		
	kg	%
Cemento	1277	-
Agua	639	50
Plastificante	6,385	0,5
MWCNTs	12,77	1

Datos sensores		
lado del cubo	106	mm
nº sensores	1	
volumen total	0,00119102	m3

Cantidad para 1 sensores		
	gr	%
Cemento	1521	-
Agua	760	50
Plastificante	8	0,5
Pelles	33,8	2,2
(MWCNT)	15,2	1
(CMC)	18,6	1,2

Datos PELLETS	% masa
MWCNT	45
CMC	55

Pérdidas (%)	50
--------------	----

Dosificación total con pérdidas		
	gr	%
Cemento	2281	-
Agua	1141	50
Plastificante	11	0,5
Pelles	50,7	2,2
(MWCNT)	22,8	1
(CMC)	27,9	1,2

Dosificación real empleada		
	gr	%
Cemento	1847	-
Agua	924	50,0
Plastificante	9	0,5
Pelles	41,1	2,2
(MWCNT)	18,5	1,00
(CMC)	22,6	1,22

### Observaciones:

.- INAMASABLE, la máquina se quedaba parada. La amasasa se DESECHÓ.

\*Rellenar solamente las celdas sombreadas en amarillo

\*\*Formato de referencia: porcentaje de CNTs (X.XX)\_CNTs\_número de amasada



## HOJA DE MEZCLAS

Referencia: **0.25\_CNTs\_7**

Fecha: 09/05/2017

Dosificación para 1 m3 de mezcla		
	kg	%
Cemento	1277	-
Agua	639	50
Plastificante	6,385	0,5
MWCNTs	3,1925	0,25

Datos sensores		
lado del cubo	51	mm
nº sensores	3	
volumen total	0,00039795	m3

Cantidad para 3 sensores		
	gr	%
Cemento	508	-
Agua	254	50
Plastificante	3	0,5
Pelles	2,8	0,6
(MWCNT)	1,3	0,25
(CMC)	1,6	0,3

Datos PELLETS	% masa
MWCNT	45
CMC	55

Pérdidas (%)	50
--------------	----

Dosificación total con pérdidas		
	gr	%
Cemento	762	-
Agua	381	50
Plastificante	4	0,5
Pelles	4,2	0,6
(MWCNT)	1,9	0,25
(CMC)	2,3	0,3

Dosificación real empleada		
	gr	%
Cemento	762	-
Agua	381	50,0
Plastificante	5	0,7
Pelles	4,2	0,6
(MWCNT)	1,9	0,25
(CMC)	2,3	0,30

### Observaciones:

.- La mezcla final parecía sopa

\*Rellenar solamente las celdas sombreadas en amarillo

\*\*Formato de referencia: porcentaje de CNTs (X.XX)\_CNTs\_número de amasada



## HOJA DE MEZCLAS

Referencia: **0.75\_CNTs\_8**

Fecha: 09/05/2017

Dosificación para 1 m3 de mezcla		
	kg	%
Cemento	1277	-
Agua	639	50
Plastificante	6,385	0,5
MWCNTs	9,5775	0,75

Datos sensores		
lado del cubo	51	mm
nº sensores	3	
volumen total	0,00039795	m3

Cantidad para	3	sensores
	gr	%
Cemento	508	-
Agua	254	50
Plastificante	3	0,5
Pelles	8,5	1,7
(MWCNT)	3,8	0,75
(CMC)	4,7	0,9

Datos PELLETS	% masa
MWCNT	45
CMC	55

Pérdidas (%)	50
--------------	----

Dosificación total con pérdidas		
	gr	%
Cemento	762	-
Agua	381	50
Plastificante	4	0,5
Pelles	12,7	1,7
(MWCNT)	5,7	0,75
(CMC)	7,0	0,92

Dosificación real empleada		
	gr	%
Cemento	762	-
Agua	381	50,0
Plastificante	5	0,7
Pelles	12,7	1,7
(MWCNT)	5,7	0,75
(CMC)	7,0	0,92

### Observaciones:

.- Se nota ya bastante menos trabajable

\*Rellenar solamente las celdas sombreadas en amarillo

\*\*Formato de referencia: porcentaje de CNTs (X.XX)\_CNTs\_número de amasada



## HOJA DE MEZCLAS

Referencia: **1.00\_CNTs\_AguaGrifo\_9**

Fecha: 09/05/2017

Dosificación para 1 m3 de mezcla		
	kg	%
Cemento	1277	-
Agua	639	50
Plastificante	6,385	0,5
MWCNTs	12,77	1

Datos sensores		
lado del cubo	51	mm
nº sensores	3	
volumen total	0,00039795	m3

Cantidad para 3 sensores		
	gr	%
Cemento	508	-
Agua	254	50
Plastificante	3	0,5
Pelles	11,3	2,2
(MWCNT)	5,1	1
(CMC)	6,2	1,2

Datos PELLETS	% masa
MWCNT	45
CMC	55

Pérdidas (%)	50
--------------	----

Dosificación total con pérdidas		
	gr	%
Cemento	762	-
Agua	381	50
Plastificante	4	0,5
Pelles	16,9	2,2
(MWCNT)	7,6	1
(CMC)	9,3	1,2

Dosificación real empleada		
	gr	%
Cemento	762	-
Agua	541	71,0
Plastificante	5	0,7
Pelles	17,0	2,2
(MWCNT)	7,7	1,0
(CMC)	9,4	1,2

### Observaciones:

- Empleando agua del grifo fue necesario añadir más, ya que la mezcla era INAMASABLE
- Con el 0,70 de agua se consiguió una trabajabilidad ideal

\*Rellenar solamente las celdas sombreadas en amarillo

\*\*Formato de referencia: porcentaje de CNTs (X.XX)\_CNTs\_número de amasada



## HOJA DE MEZCLAS

Referencia: **Sonicación 1%CNTs**

Fecha: 21/03/2017

Dosificación para 1 m3 de mezcla		
	kg	%
Cemento	1277	-
Agua	575	45
Plastificante	12,77	1
MWCNTs	12,77	1

Datos sensores		
lado del cubo	51	mm
nº sensores	11,8	
volumen total	0,00156528	m3

Cantidad para	11,8	sensores
	gr	%
Cemento	1999	-
Agua	899	45
Plastificante	20	1
Pelles	44,4	2,2
(MWCNT)	20,0	1
(CMC)	24,4	1,2

Datos PELLETS	% masa
MWCNT	45
CMC	55

Pérdidas (%)	10
--------------	----

Dosificación total con pérdidas		
	gr	%
Cemento	2199	-
Agua	989	45
Plastificante	22	1
Pelles	48,9	2,2
(MWCNT)	22,0	1
(CMC)	26,9	1,2

Dosificación real empleada		
	gr	%
Cemento	2199	-
Agua	989	45,0
Plastificante	22	1,0
Pelles	48,9	2,2
(MWCNT)	22,0	1,0
(CMC)	26,9	1,2

Observaciones:

\*Rellenar solamente las celdas sombreadas en amarillo

\*\*Formato de referencia: porcentaje de CNTs (X.XX)\_CNTs\_número de amasada



## HOJA DE MEZCLAS

Referencia: **Sonificación 2%CNTs**

Fecha: 21/03/2017

Dosificación para 1 m3 de mezcla		
	kg	%
Cemento	1277	-
Agua	575	45
Plastificante	12,77	1
MWCNTs	25,54	2

Datos sensores		
lado del cubo	51	mm
nº sensores	11,8	
volumen total	0,00156528	m3

Cantidad para	11,8	sensores
	gr	%
Cemento	1999	-
Agua	899	45
Plastificante	20	1
Pelles	88,8	4,4
(MWCNT)	40,0	2
(CMC)	48,9	2,4

Datos PELLETS	% masa
MWCNT	45
CMC	55

Pérdidas (%)	10
--------------	----

Dosificación total con pérdidas		
	gr	%
Cemento	2199	-
Agua	989	45
Plastificante	22	1
Pelles	97,7	4,4
(MWCNT)	44,0	2
(CMC)	53,7	2,4

Dosificación real empleada		
	gr	%
Cemento	2199	-
Agua	989	45,0
Plastificante	22	1,0
Pelles	97,7	4,4
(MWCNT)	44,0	2,0
(CMC)	53,7	2,4

Observaciones:

\*Rellenar solamente las celdas sombreadas en amarillo

\*\*Formato de referencia: porcentaje de CNTs (X.XX)\_CNTs\_número de amasada



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**EPS**

Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Málaga

# TRABAJO FIN DE GRADO

## **ANEXO B. Planos Molde**

***“Caracterización y fabricación de sensores de cemento con nanotubos de carbono (CNTs)”***

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: JOSÉ LUIS GÓMEZ RODA

Tutor: GERMÁN CASTILLO LÓPEZ

Cotutor: FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ

junio de 2.017

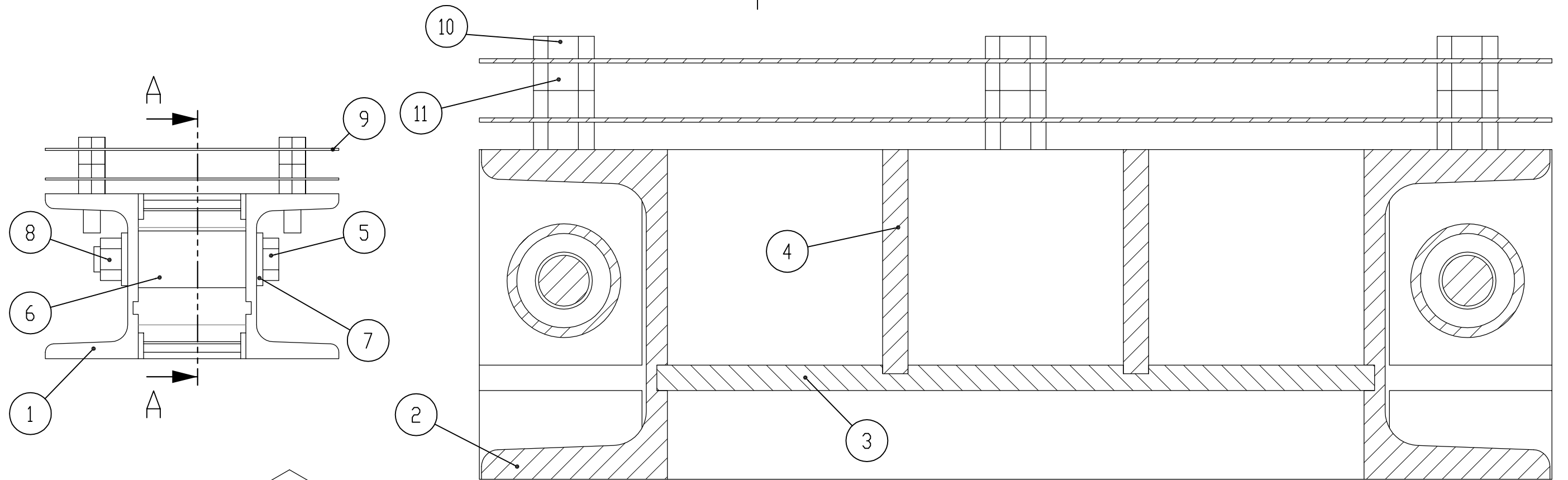




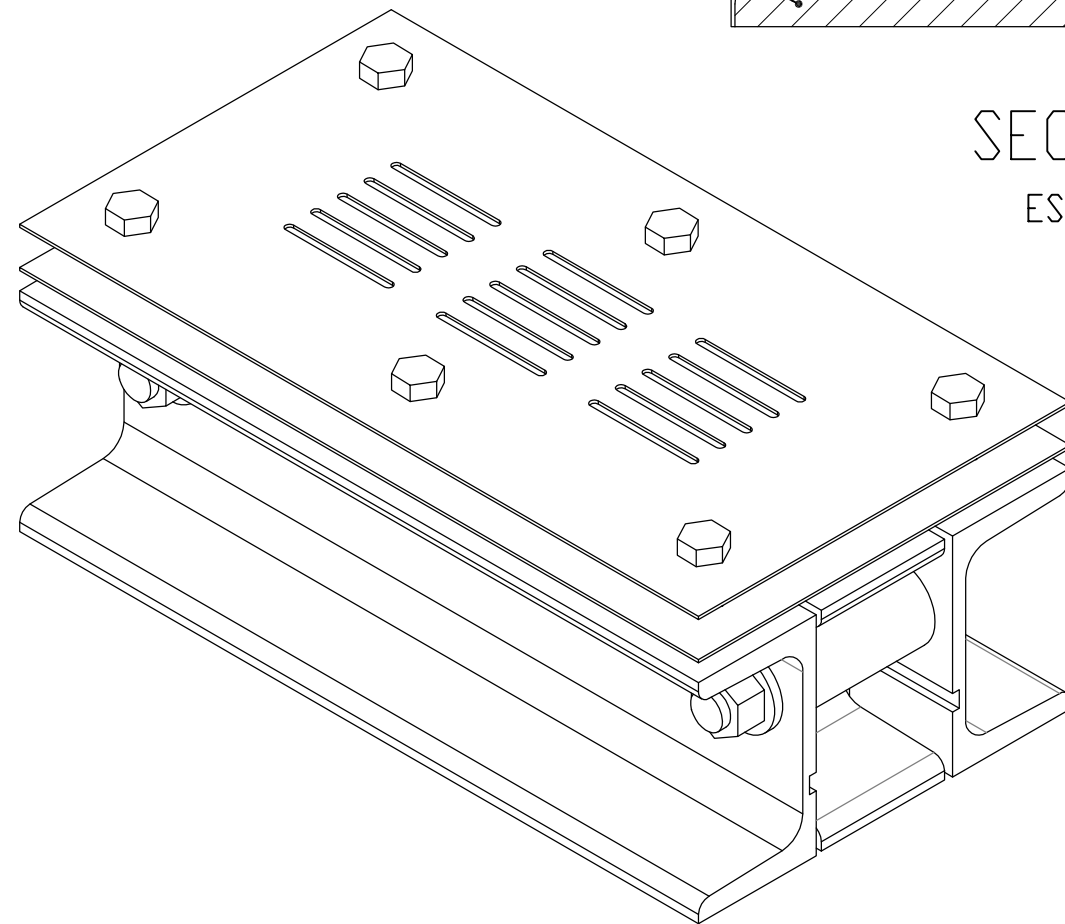
**Anexo B. Planos Molde**

**ÍNDICE ANEXO B. Planos Molde**

- 1    CONJUNTO MOLDE**
- 2    PIEZA 1 – PERFIL LONGITUDINAL**
- 3    PIEZA 2 – PERFIL TRANSVERSAL**
- 4    PIEZA 3 – PLACA BASE**
- 5    PIEZA 4 – PLACA VERTICAL**
- 6    PIEZA 6 – TUBO DE ACERO**
- 7    PIEZA 9 - PLANTILLA**

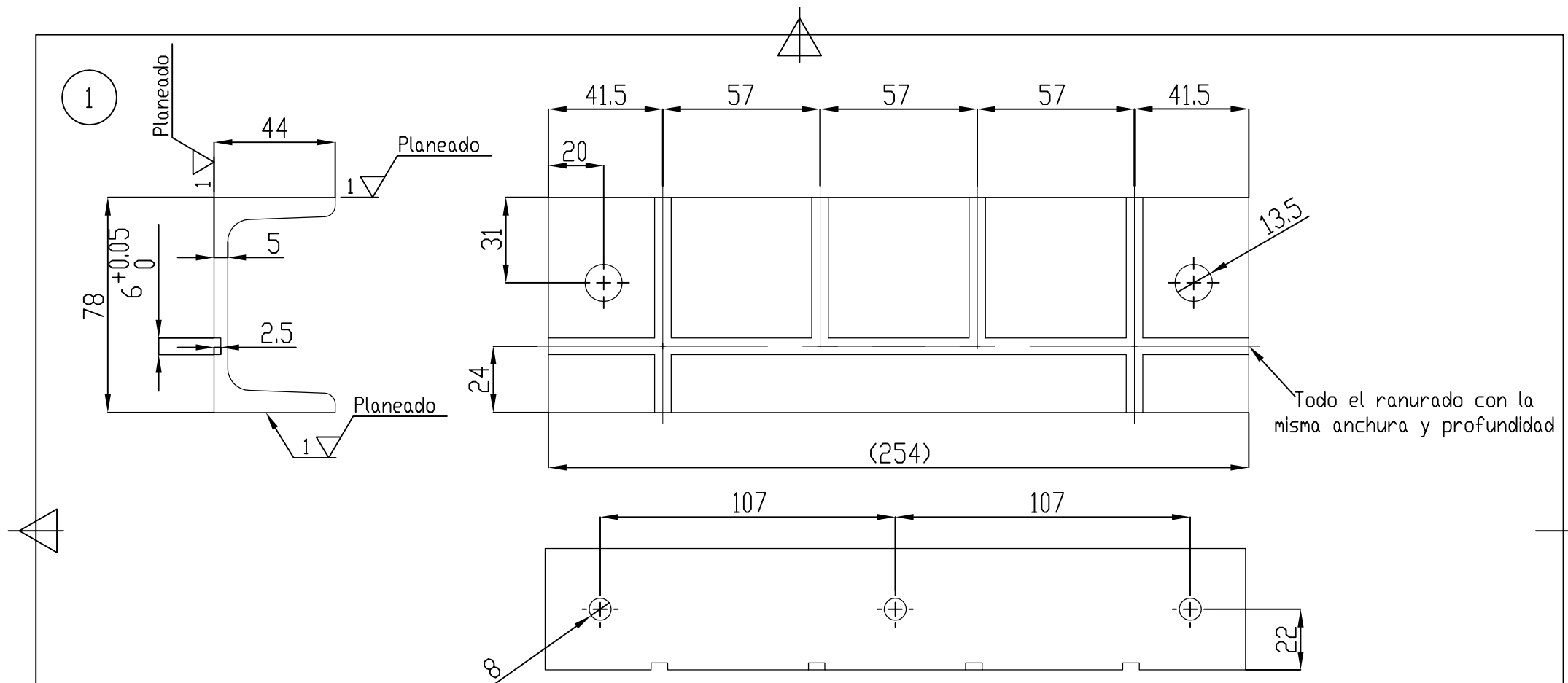


SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 1

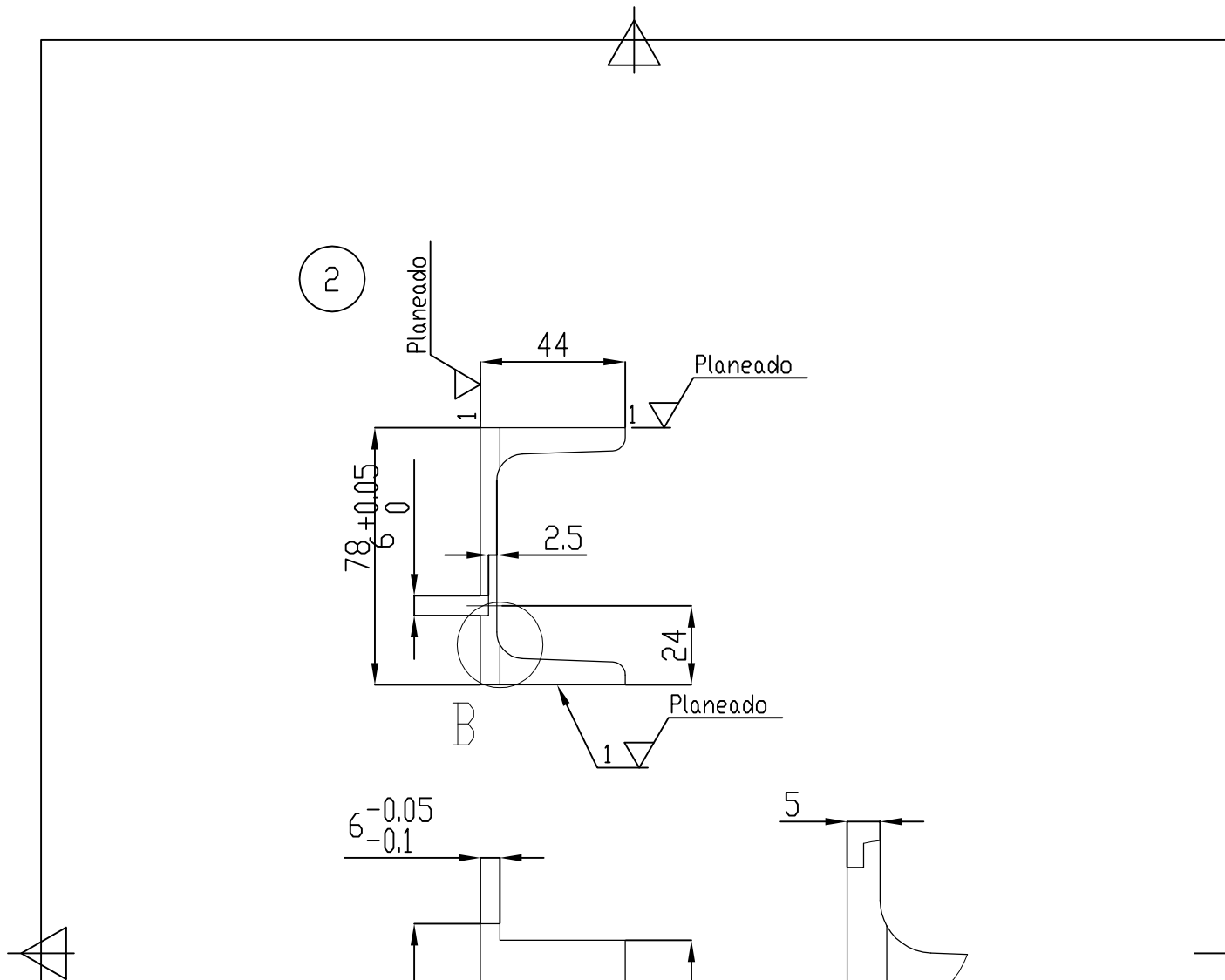


N.º ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Perfil Longitudinal	UPN80	2
2	Perfil Transversal	UPN80	2
3	Placa Base	Plancha mecanizada	1
4	Placa Vertical	Plancha mecanizada	2
5	Tornillo M12	long. 80mm DIN EN ISO 4017	2
6	Tubo Acero	ISO R65 Serie Ligera II	2
7	Arandela 12-25-3	DIN EN ISO 28738	4
8	Tuerca M12	DIN EN ISO 4032	2
9	Plantilla	Chapa 1mm	2
10	Tornillo M8	long. 40mm DIN EN ISO 4017	6
11	Tuerca M8	DIN EN ISO 4032	18

Escuela Politécnica Superior	Universidad de Málaga	Curso: 2016/2017
Apellidos: Gómez Roda	Fecha: 22/02/2017	
Nombre: José Luis	D.N.I: 25351800G	
Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica	Cotas en: mm	
PLANO: Conjunto Molde	Nº PLANO: 1	
TÍTULO: Caracterización y fabricación de sensores de cemento con nanotubos de carbono (CNTs)	Escala: 1:2	Firma:



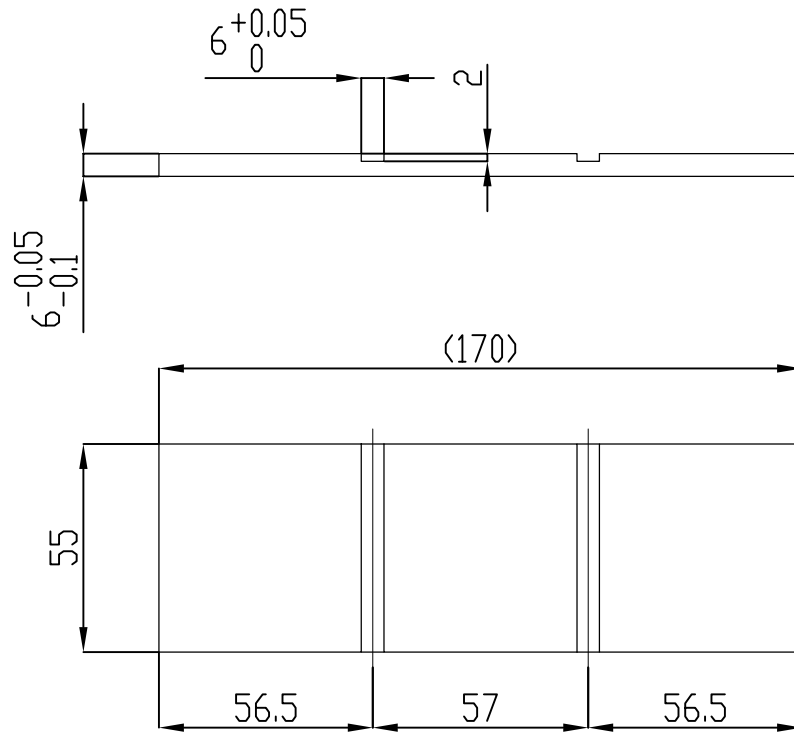
Escuela Politécnica Superior	Universidad de Málaga	Curso: 2016/2017
Apellidos: Gómez Roda		Fecha: 21/02/2017
Nombre: José Luis		D.N.I.: 25351800G
Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica		Cotas en: mm
PLANO: Pieza 1 – Perfil Longitudinal		N° PLANO: 2
TÍTULO: Caracterización y fabricación de sensores de cemento con nanotubos de carbono (CNTs)	Escala: 1:2	Firma:



DETALLE B  
ESCALA 1 : 1

Escuela Politécnica Superior	Universidad de Málaga	Curso: 2016/2017
Apellidos: Gómez Roda		Fecha: 17/01/2017
Nombre: José Luis		D.N.I: 25351800G
Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica		Cotas en: mm
PLANO: Pieza 2 - Perfil Transversal		Nº PLANO: 3
TÍTULO: Caracterización y fabricación de sensores de cemento con nanotubos de carbono (CNTs)	Escala: 1:2	Firma:

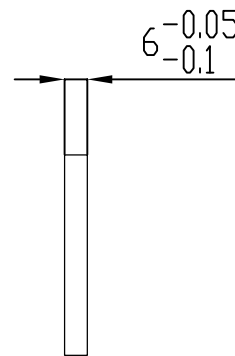
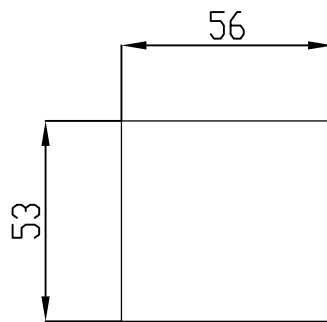
3



Escuela Politécnica Superior	Universidad de Málaga	Curso: 2016/2017
Apellidos: Gómez Roda		Fecha: 17/01/2017
Nombre: José Luis		D.N.I: 25351800G
Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica		Cotas en: mm
PLANO: Pieza 3 – Placa Base		Nº PLANO: 4
TÍTULO: Caracterización y fabricación de sensores de cemento con nanotubos de carbono (CNTs)	Escala: 1:2	Firma:

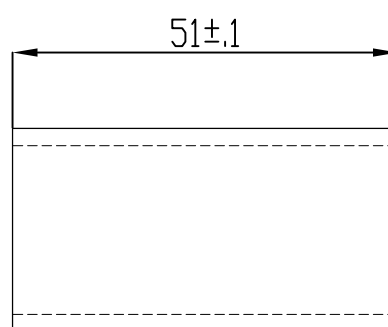
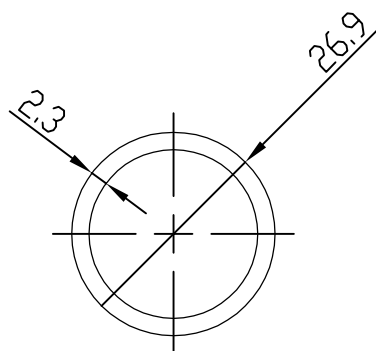


4



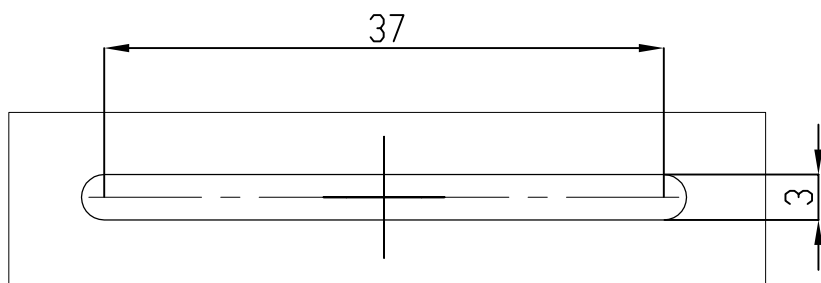
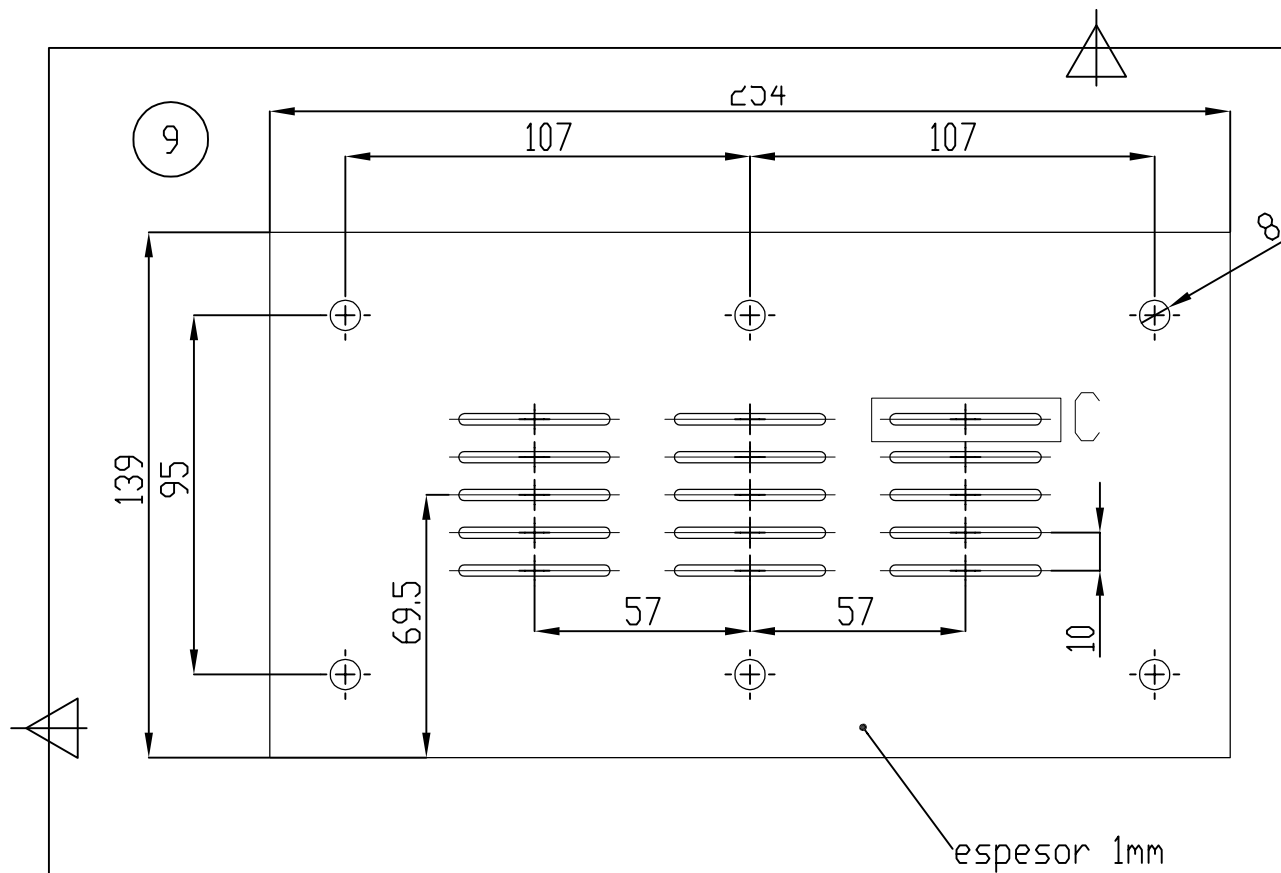
Escuela Politécnica Superior	Universidad de Málaga	Curso: 2016/2017	
Apellidos: Gómez Roda		Fecha: 17/01/2017	
Nombre: José Luis		D.N.I: 25351800G	
Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica		Cotas en: mm	
PLANO: Pieza 4 – Placa Vertical		Nº PLANO: 5	
TÍTULO: Caracterización y fabricación de sensores de cemento con nanotubos de carbono (CNTs)		Escala: 1:2	Firma:

6



Escuela Politécnica Superior	Universidad de Málaga	Curso: 2016/2017
Apellidos: Gómez Roda	Fecha: 17/01/2017	
Nombre: José Luis	D.N.I: 25351800G	
Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica	Cotas en: mm	
PLANO: Pieza 6 – Tubo de Acero	Nº PLANO: 6	
TÍTULO: Caracterización y fabricación de sensores de cemento con nanotubos de carbono (CNTs)	Escala: 1:2	Firma:





DETALLE c  
ESCALA 2 : 1

Escuela Politécnica Superior	Universidad de Málaga	Curso: 2016/2017
Apellidos: Gómez Roda		Fecha: 22/02/2017
Nombre: José Luis		D.N.I.: 25351800G
Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica		Cotas en: mm
PLANO: Pieza 9 – Plantilla		N° PLANO: 7
TÍTULO: Caracterización y fabricación de sensores de cemento con nanotubos de carbono (CNTs)		Escala: 1:2 Firma:



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**EPS**

Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Málaga

# TRABAJO FIN DE GRADO

**ANEXO C. Guía Rápida para usar el programa de LabVIEW**

***“Caracterización y fabricación de sensores de cemento con nanotubos de carbono (CNTs)”***

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: JOSÉ LUIS GÓMEZ RODA

Tutor: GERMÁN CASTILLO LÓPEZ

Cotutor: FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ

junio de 2.017



**Anexo C. Guía Rápida para usar el programa de LabVIEW**

**ÍNDICE ANEXO C. Guía Rápida para usar el programa de LabVIEW**

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>PRIMER PASO: EJECUTAR EL PROGRAMA.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>AJUSTE DE PARÁMETROS PARA REALIZAR ENSAYOS.....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>AJUSTE DE PARÁMETROS PARA REALIZAR ENSAYOS A 10 HZ (USO COMBINADO CON LA MÁQUINA DE TRACCIÓN) .....</b>	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>COMENZAR EL ENSAYO .....</b>	<b>10</b>
<b>6</b>	<b>FINALIZAR LA MEDICIÓN Y SALIR.....</b>	<b>12</b>
<b>7</b>	<b>PROBLEMAS MÁS FRECUENTES Y POSIBLES SOLUCIONES .....</b>	<b>14</b>

***Anexo C. Guía Rápida para usar el programa de LabVIEW***

## **1 Introducción**

Con la presente Guía Rápida se pretende explicar cómo usar el programa desarrollado en LabVIEW por el equipo de la Universidad de Perugia, ya que sin un mínimo de conocimientos resultaría un tanto complicado trabajar con él debido a la interfaz poco intuitiva que presenta.

Este programa trabaja de la siguiente forma:

- Se excita el sensor con una diferencia de potencial constante de 10 V. Es decir, la señal de salida es 10 V constante.
- Se mide la intensidad, en mA, que circula por el sensor. Los datos de intensidad se recuperan en un archivo de texto. Es decir, la intensidad es la señal de entrada.

## Anexo C. Guía Rápida para usar el programa de LabVIEW

### 2 Primer paso: ejecutar el programa

El programa se encuentra en un archivo de LabVIEW llamado: *Setup\_Nanosensor\_long\_acq\_tm\_var\_V.vi*<sup>1</sup>, el cual se debe abrir (doble click, botón derecho abrir...).

En caso de que se esté trabajando con el portátil DELL del taller nº 28 (se supone que será así por cuestiones obvias) aparecerá la ventana emergente de la Ilustración 2-1 sobre el “Estado de la Licencia”. En la columna de la derecha pulsar la primera opción: *Launch LabVIEW*. A continuación se mostrará el mensaje de la Ilustración 2-2, al cual se responderá *No*.

Ahora LabVIEW cargará el archivo en durante unos segundos y en la pantalla se mostrará lo correspondiente a la Ilustración 2-3.

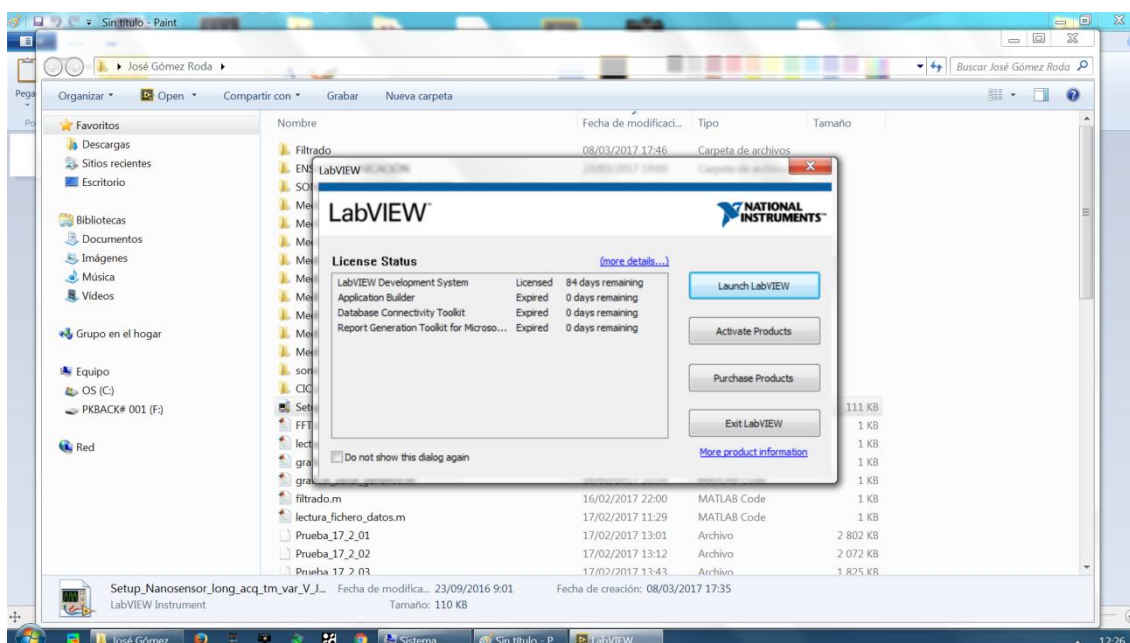


Ilustración 2-1 Mensaje License Status

<sup>1</sup> En las diferentes imágenes que acompañan la presente Guía Rápida se llama *Setup\_Nanosensor\_long\_acq\_tm\_var\_V\_Jose.vi* debido a que se ha trabajado con una copia del original.

## Anexo C. Guía Rápida para usar el programa de LabVIEW

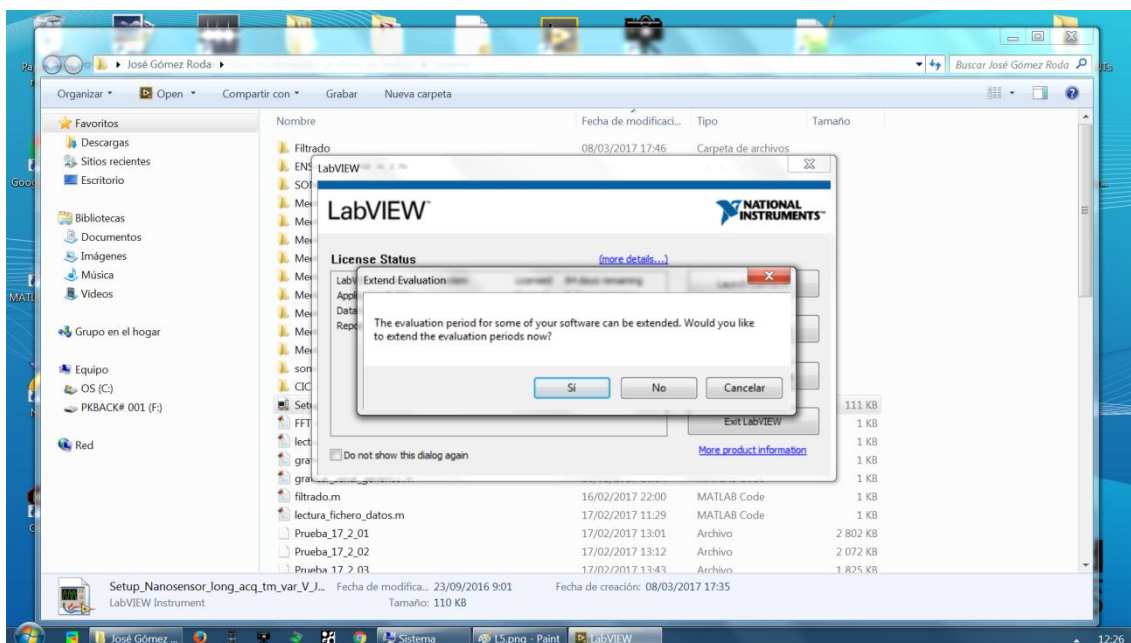


Ilustración 2-2 Mensaje Extended Evaluation

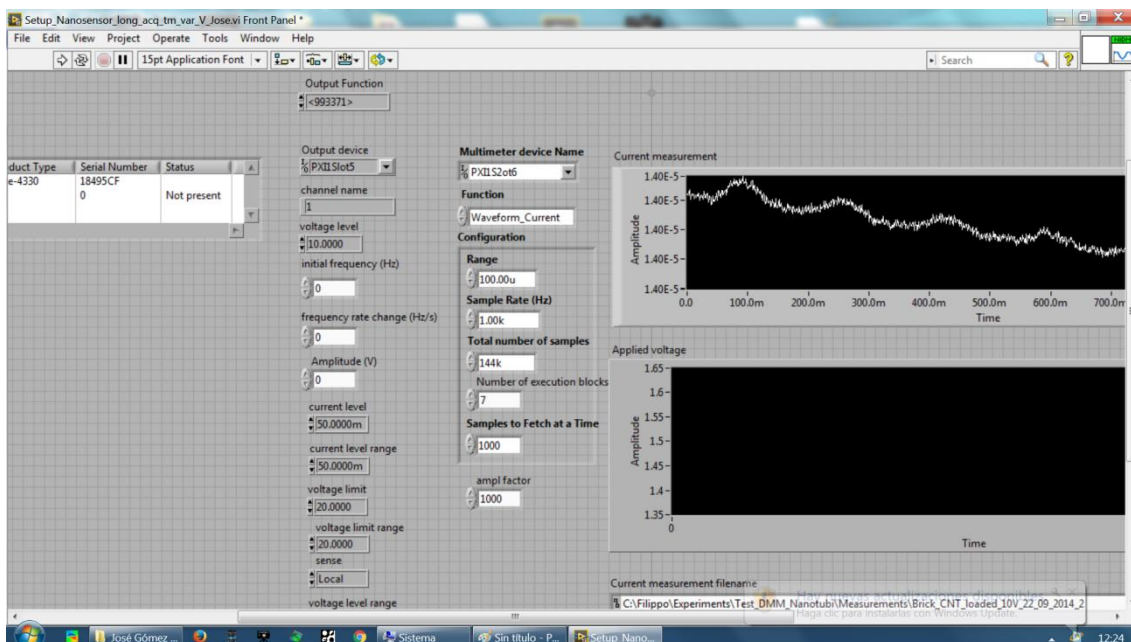


Ilustración 2-3 Archivo cargado



### Anexo C. Guía Rápida para usar el programa de LabVIEW

## 3 Ajuste de parámetros para realizar ensayos

A continuación se detallará que valores introducir en cada opción para realizar cualquier tipo de ensayo utilizando una frecuencia de adquisición de datos de 1000 Hz.

En primera columna de parámetros, señalada en la, se introducen los valores de la Tabla 3-1.

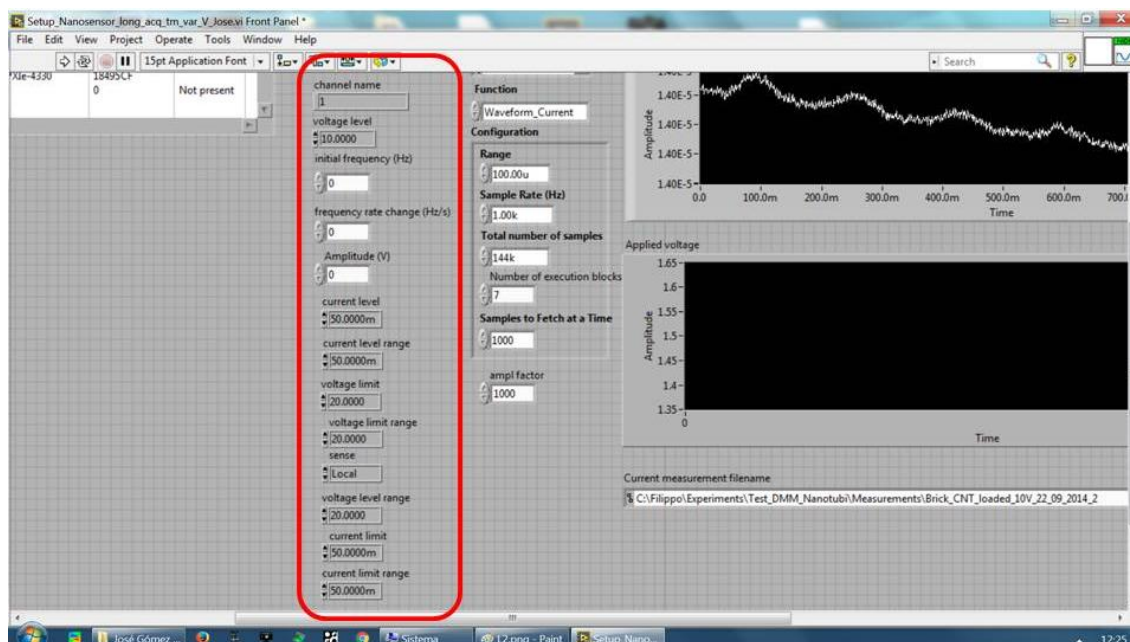


Ilustración 3-1 Primera columna de parámetros

Parámetro	Valor	Comentario
channel name	1	
voltaje level	10.000	Voltaje con el cual se excitará el sensor. En este caso es de 10 V.
initial frequency (Hz)	0	
frequency rate change (Hz/s)	0	
Amplitude (V)	0	
current level	50.0000m	
current level range	50.0000m	
voltage limit	20.0000	
voltage limit	20.0000	
sense	Local	
voltage level range	20.0000	
current limit	50.0000m	Estos dos parámetros controlan la intensidad máxima. Con el valor programado será de 50 mA. <sup>2</sup>
current limit range	50.0000m	

Tabla 3-1 Valores a introducir en los parámetros de la primera columna

<sup>2</sup> En teoría estos dos parámetros son los que controlan la intensidad máxima, pero para cambiarla es necesario introducir el mismo valor también en *current level* y en *current level range*.

## Anexo C. Guía Rápida para usar el programa de LabVIEW

Igualmente, también se cambiarán los parámetros de la segunda columna (Ilustración 3-2) por los de la Tabla 3-2.

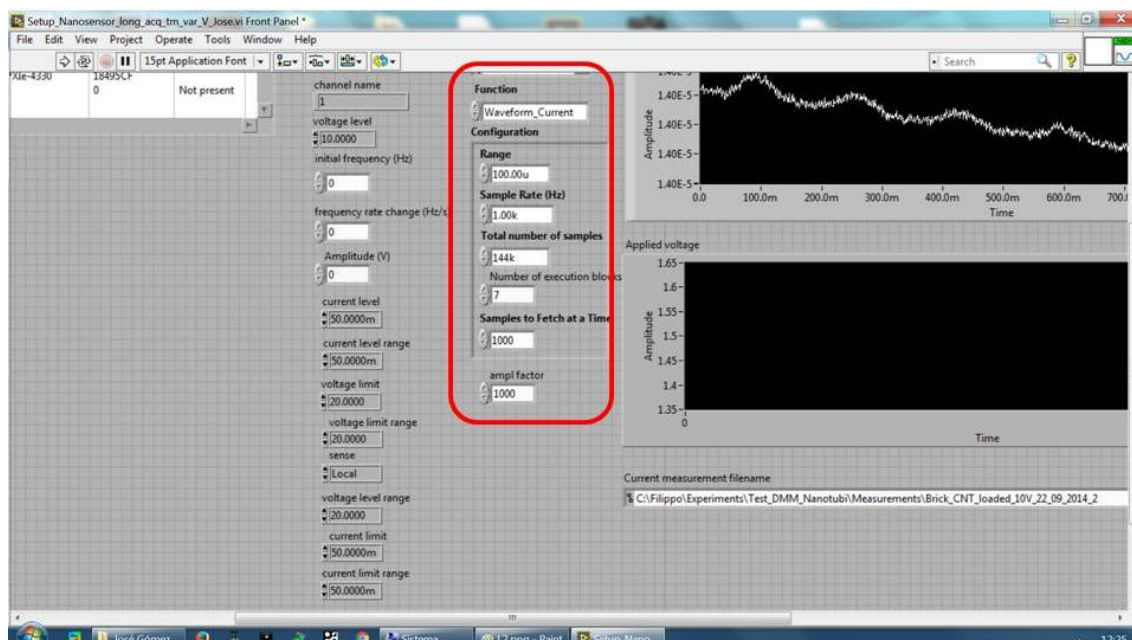


Ilustración 3-2 Segunda columna de parámetros

Parámetro	Valor	Comentario
Multimeter device Name	PXI1S2ot6	Aunque no parezca lógico, el programa detecta que la tarjeta se encuentra en el slot 2.
Function	Waveform_Current	
Range	100.00u 100.00m etc.	Es la escala de visualización de la señal de entrada. Se debe ir cambiando en función de dicha señal. Indicar que 'u' significa micro ( $10^{-6}$ ) y 'm' mili ( $10^{-3}$ )
Sample Rate (Hz)	1.00k	Es la frecuencia de muestreo. Por defecto será de 1000 Hz (1k). En caso de cambiarla consultar el apartado 4 donde se disminuye a 10 Hz.
Total number of samples	144k	Número de muestras tomadas en cada bloque de ejecución del programa.
Number of execution blocks	7	Es el número de bloques que se ejecutará el programa. A mayor número de bloques mayor tiempo de toma de datos. Cambiar según las necesidades teniendo en cuenta que con esta configuración la duración de cada

**Anexo C. Guía Rápida para usar el programa de LabVIEW**

		bloque es de 144 segundos.
Samles to Fetch at a Time	1000	Es un parámetro para sincronizar el tiempo real transcurrido. Deberá de coincidir con la frecuencia de muestreo ( <i>Simple Rate</i> ).
ampl factor	1000	Es un factor de amplificación de la señal medida. Con este programa se mide intensidad de corriente, y al ser el factor de amplificación 1000 quiere decir que los resultados dados están multiplicados por 1000, luego se da dichos valores en mA. Si este parámetro fuera 1 los resultados estarían en A.

Tabla 3-2 Valores a introducir en los parámetros de la segunda columna

#### 4 Ajuste de parámetros para realizar ensayos a 10 Hz (uso combinado con la máquina de tracción)

En caso de realizar la medición en un ensayo combinado con la máquina de tracción configurada para carga estática no será necesario una frecuencia de muestreo tan alta. Para poder sincronizar los datos del ensayo de tracción con los de resistencia será necesario cambiar la frecuencia a 10 Hz para que coincida con los de la máquina de tracción.

Para modificar la frecuencia a 10 Hz se deberá cambiar parámetros de la segunda columna por los indicados en la Tabla 4-1. Los parámetros modificados se encuentran sombreados.

Parámetro	Valor	Comentario
Multimeter device Name	PXI1S2ot6	Aunque no parezca lógico, el programa detecta que la tarjeta se encuentra en el slot 2.
Function	Waveform_Current	
Range	100.00u 100.00m etc.	Es la escala de visualización de la señal de entrada. Se debe ir cambiando en función de dicha señal. Indicar que 'u' significa micro ( $10^{-6}$ ) y 'm' mili ( $10^{-3}$ )
Sample Rate (Hz)	10	Es la frecuencia de muestreo. En este caso es de 10 Hz.
Total number of samples	1k	Número de muestras tomadas en cada bloque de ejecución del programa.
Number of execution blocks	200	Es el número de bloques que se ejecutará el programa. A mayor número de bloques mayor tiempo de toma de datos. Cambiar según las necesidades teniendo en cuenta que con esta configuración la duración de cada bloque es de 144 segundos.
Samles to Fetch at a Time	10	Es un parámetro para sincronizar el tiempo real transcurrido. Deberá de coincidir con la frecuencia de muestreo ( <i>Simple Rate</i> ).
ampl factor	1000	Es un factor de amplificación de la señal medida. Con este programa se mide intensidad de corriente, y al ser el factor de amplificación 1000 quiere decir que los resultados dados están multiplicados por 1000, luego se da dichos valores en mA. Si este parámetro fuera 1 los resultados estarían en A.

Tabla 4-1 Valores a introducir en la segunda columna para una frecuencia de 10 Hz

## Anexo C. Guía Rápida para usar el programa de LabVIEW

### 5 Comenzar el ensayo

Una vez que estén todos los parámetros adecuadamente definidos podrá comenzar la medición.

En la opción señalada en la Ilustración 5-1 se especificará la ubicación donde se guardará el archivo con los resultados y el nombre del mismo.

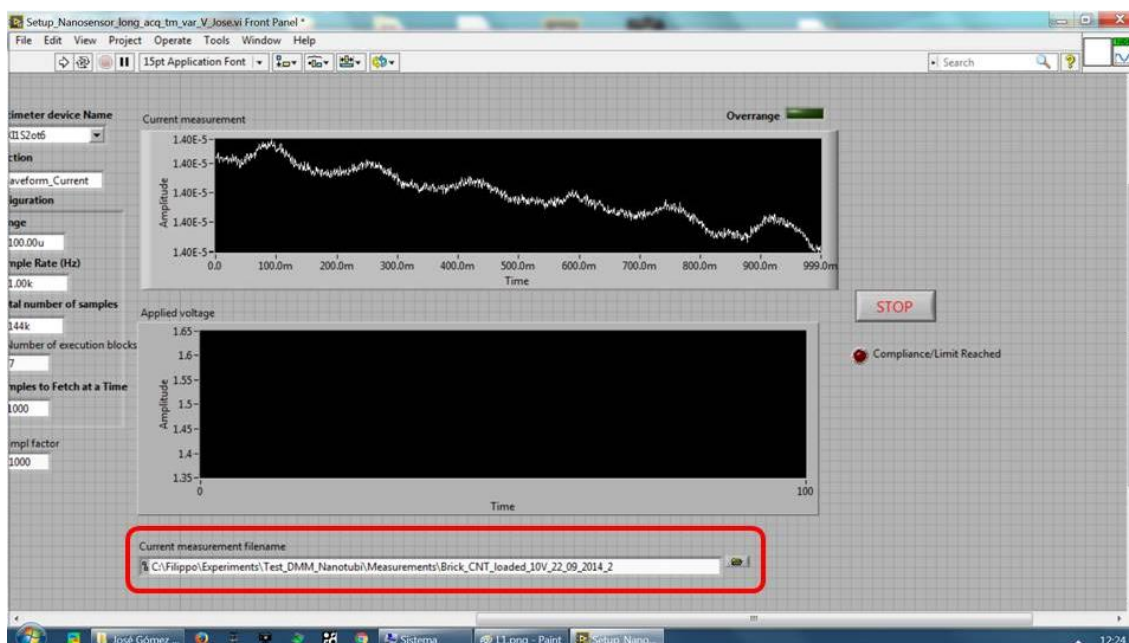


Ilustración 5-1 Guardar resultados

#### ¡IMPORTANTE!

Asegurarse antes de cada ensayo que el nombre del archivo para guardar los resultados es diferente del anterior, pues si es el mismo se reescribirá el archivo perdiendo la información.

Para iniciarla medición se pulsará el botón señalado en rojo en la Ilustración 5-2. En ese momento desaparecen los cuadritos del fondo del programa y se queda del mismo color gris. En la gráfica señalada de color amarillo se visualizará el valor de la intensidad medida, y en la gráfica señalada en color azul la señal de salida, que corresponderá a una recta con valor constante de 10 V.

**Anexo C. Guía Rápida para usar el programa de LabVIEW**

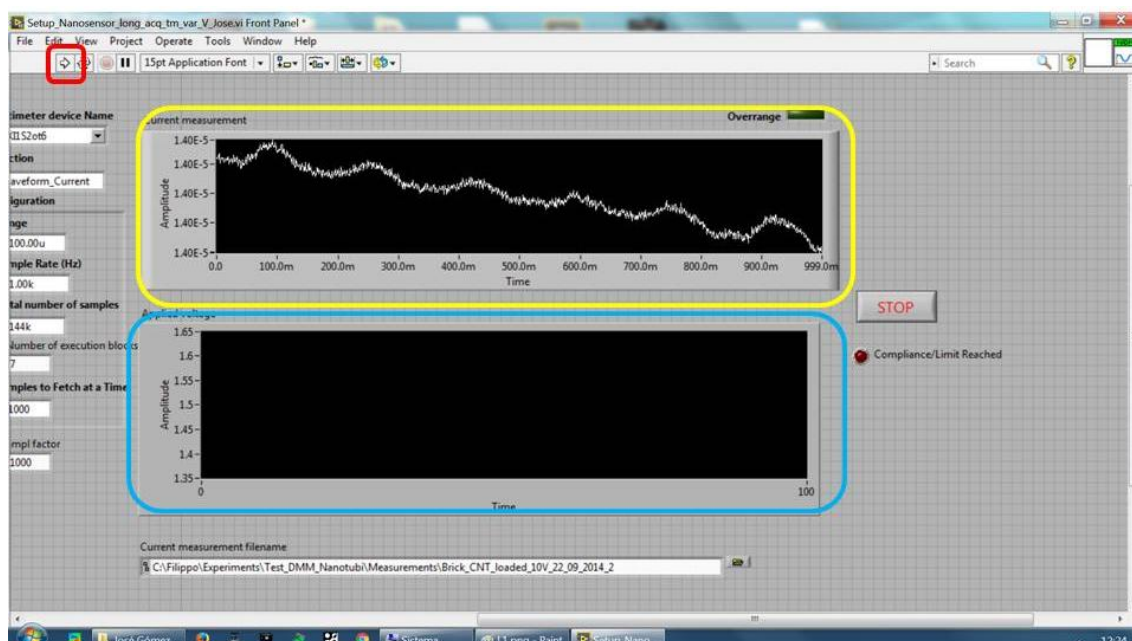
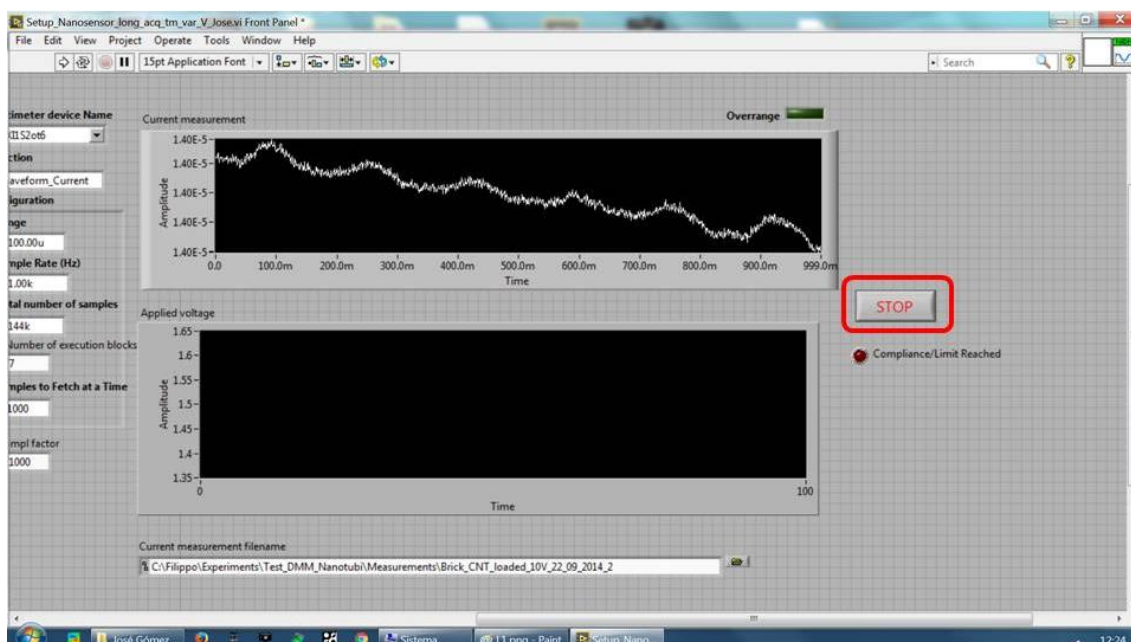


Ilustración 5-2 Inicio de medición



## 6 Finalizar la medición y salir

Para finalizar la medición pulsar el botón de *STOP* señalado en la Ilustración 6-1. En este momento volverá a aparecer la rejilla de cuadraditos en el fondo.



**Ilustración 6-1 Finalizar medición**

En este momento se puede realizar una nueva medición (no olvidar cambiar el nombre del archivo por el nuevo) o cerrar el programa. Para cerrar el programa pulsar arriba a la derecha la X sobre el fondo rojo de cerrar la ventana. Tras unos instantes saldrá el mensaje de la Ilustración 6-2. Pulsar en *Don't Save*, para así no guardar ningún cambio realizado. Tras unos segundos se cerrará LabVIEW.

## Anexo C. Guía Rápida para usar el programa de LabVIEW

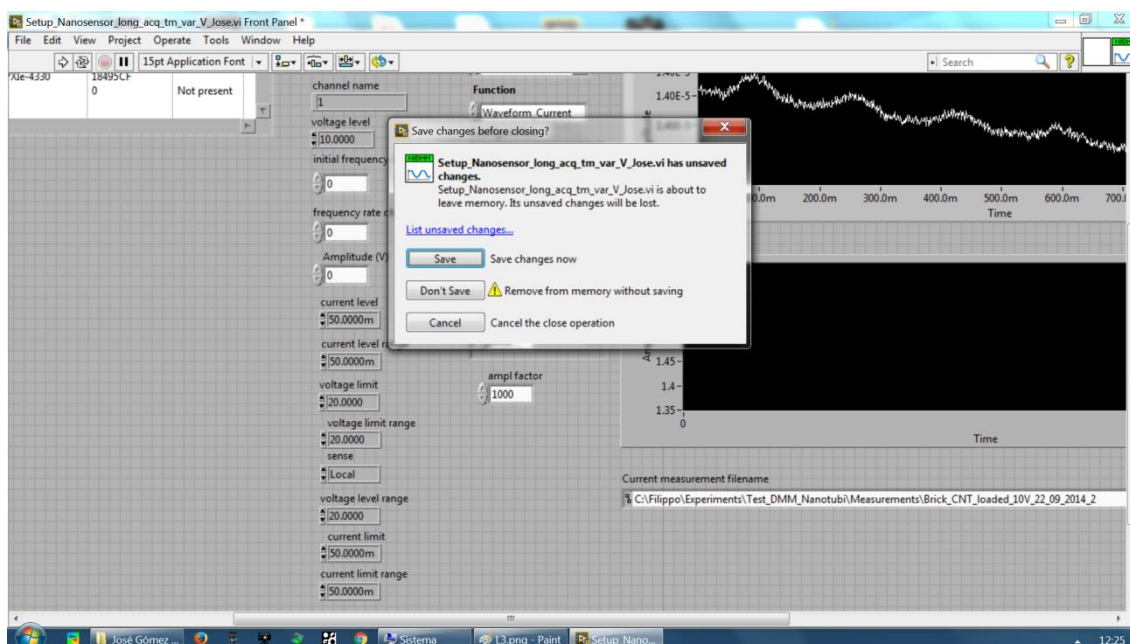


Ilustración 6-2 Mensaje para "guardar" al salir

En la ruta especificada podrá encontrarse un archivo de texto con todos los datos recogidos durante la medición.



## 7 Problemas más frecuentes y posibles soluciones

- Aparece en rojo el indicador de **Overrange** (Ilustración 7-1). Es debido a que con la escala seleccionada no se puede mostrar la medida en el gráfico por amplificar demasiado. Ir disminuyendo la escala hasta que desaparezca el error. En muchas ocasiones, después de cambiar la escala, será necesario iniciar de nuevo la medición para que desaparezca el error.

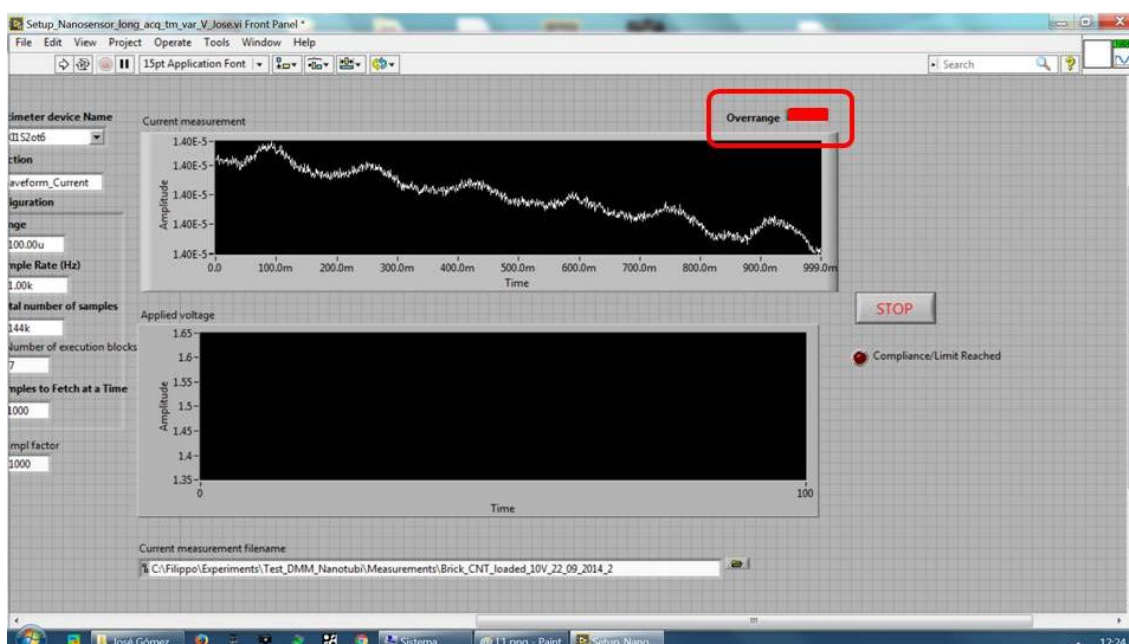


Ilustración 7-1 Indicador **Overrange**

- Se ilumina la señal **Compliance/Limit Reached** (Ilustración 7-2) o los valores de la intensidad coinciden con el límite indicado en la columna primera. Aumentar el valor de la intensidad en los siguientes parámetros de la primera columna: *current level*, *current level range*, *current limit* y *current limit range*. Utilizar el mismo valor para todos ellos. Se recomienda ir aumentando el límite progresivamente teniendo en cuenta que el máximo del equipo es de 2 A.

## Anexo C. Guía Rápida para usar el programa de LabVIEW

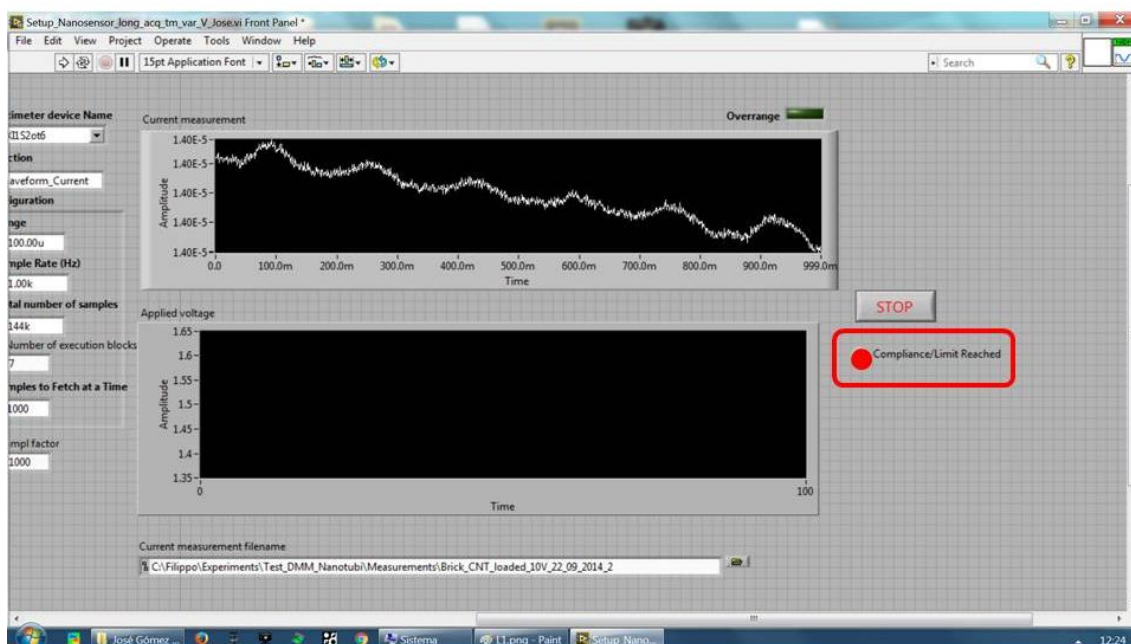


Ilustración 7-2 Error Compliance/Limit Reached



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**EPS**

Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Málaga

# TRABAJO FIN DE GRADO

## **ANEXO D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

***“Caracterización y fabricación de sensores de cemento con nanotubos de carbono (CNTs)”***

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: JOSÉ LUIS GÓMEZ RODA

Tutor: GERMÁN CASTILLO LÓPEZ

Cotutor: FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ

junio de 2.017



**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

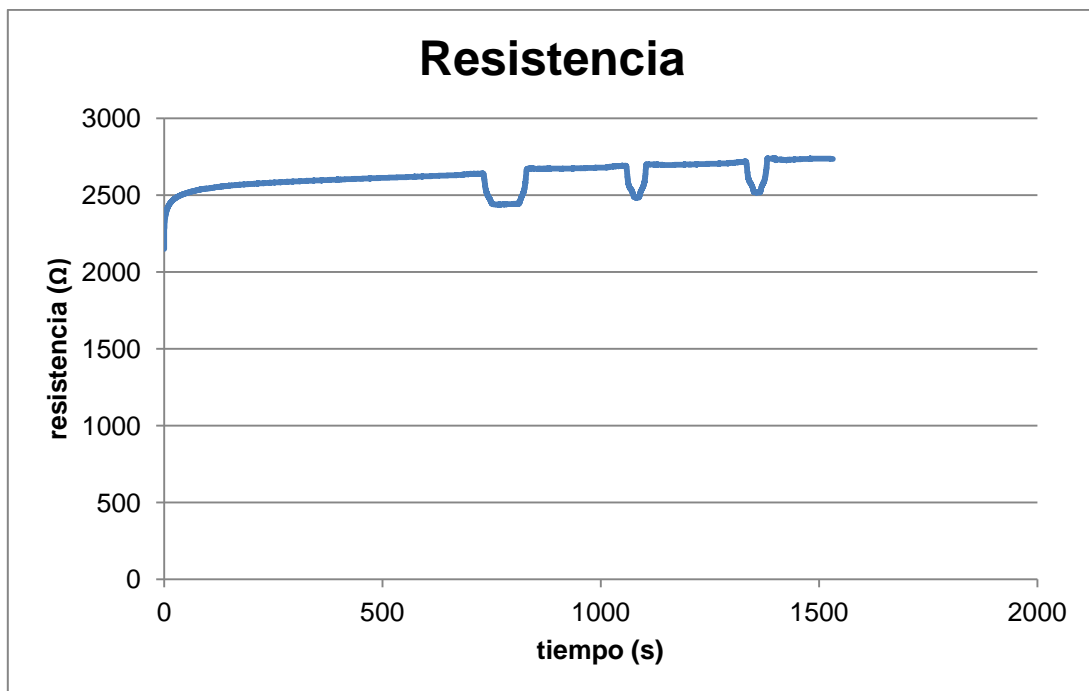
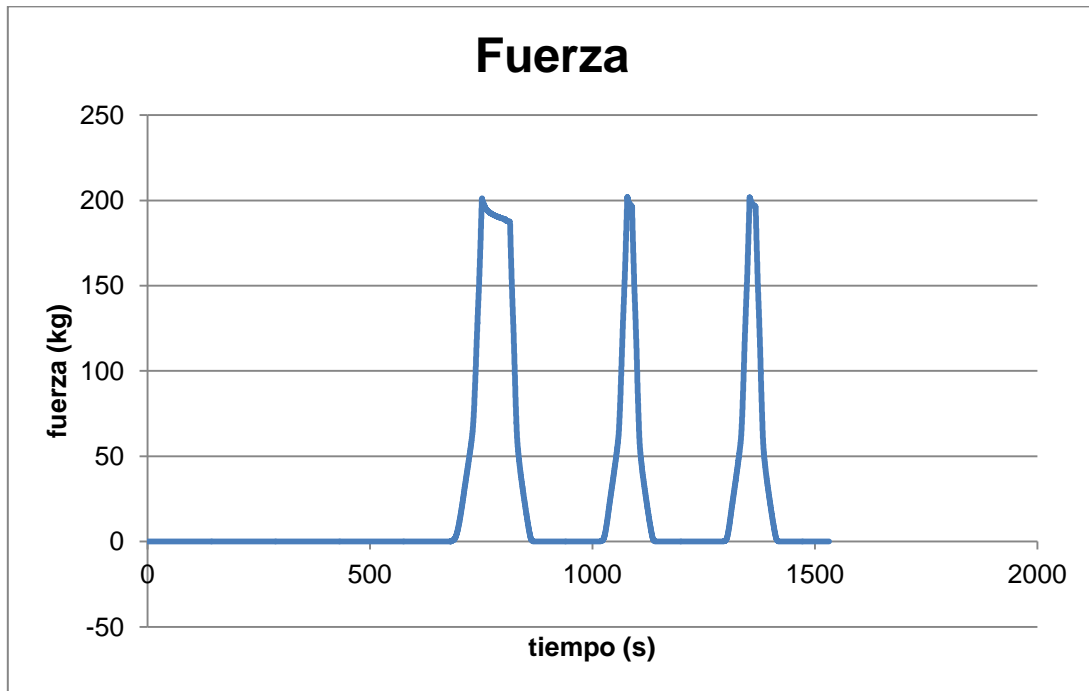
**ÍNDICE ANEXO D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

1	SENSOR 23.....	3
2	SENSOR 24.....	15
3	SENSOR 33.....	24
4	SENSOR 35.....	36
5	SENSOR 38.....	45
6	SENSOR 43.....	54
7	SENSOR 44.....	63
8	SENSOR 45.....	72
9	SENSOR 211.....	81

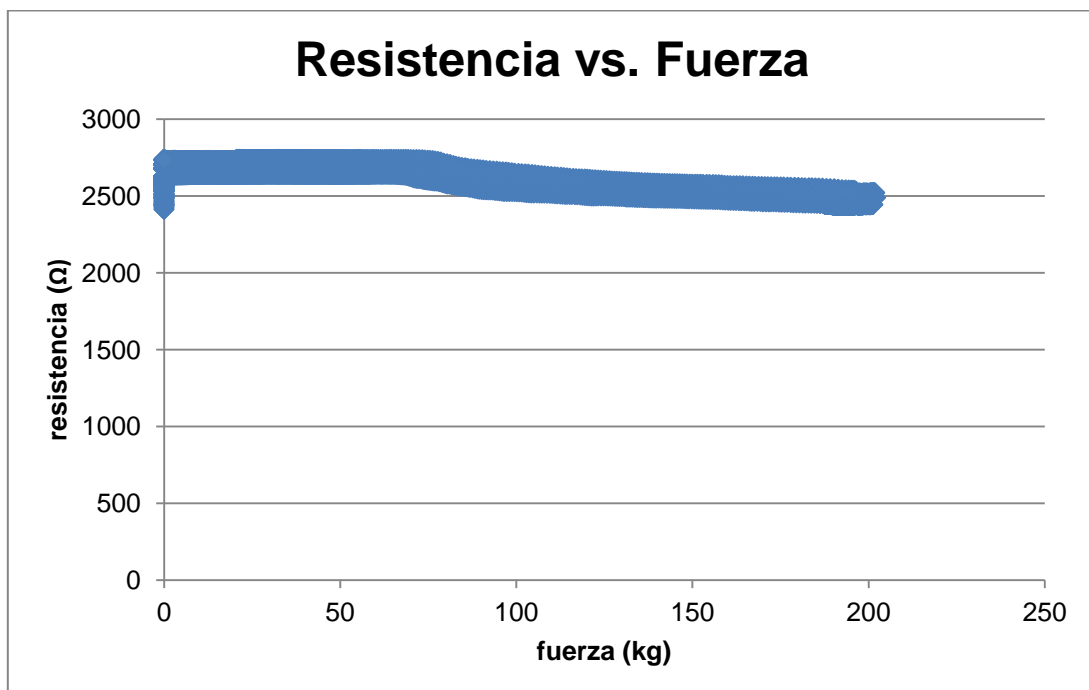
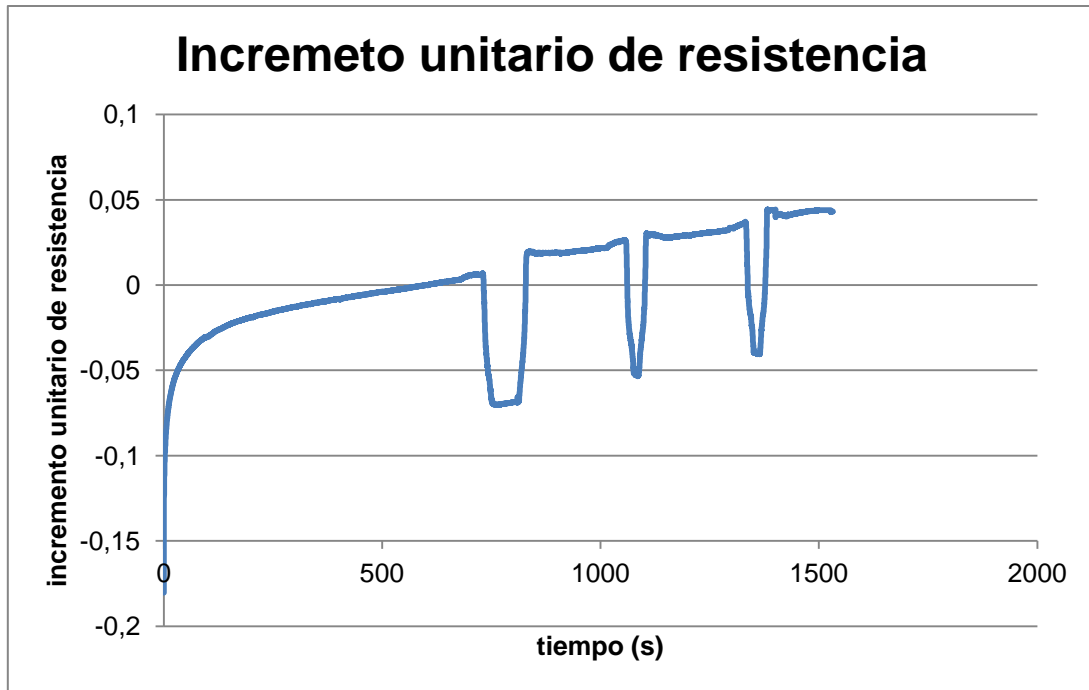
***Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga***

**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

**1 Sensor 23**

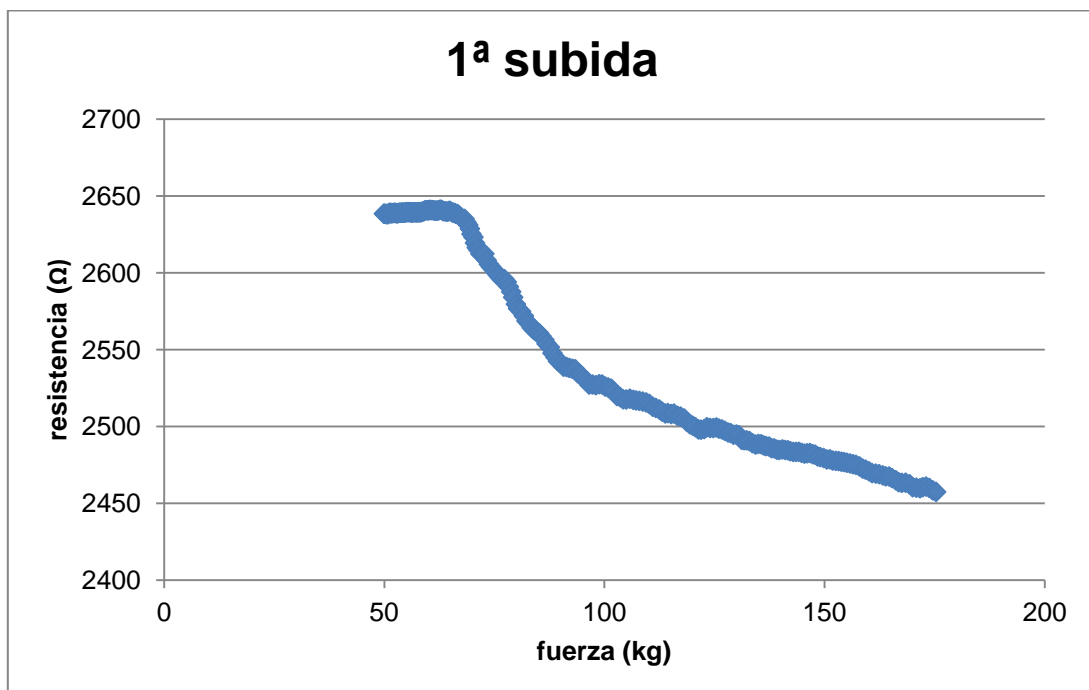
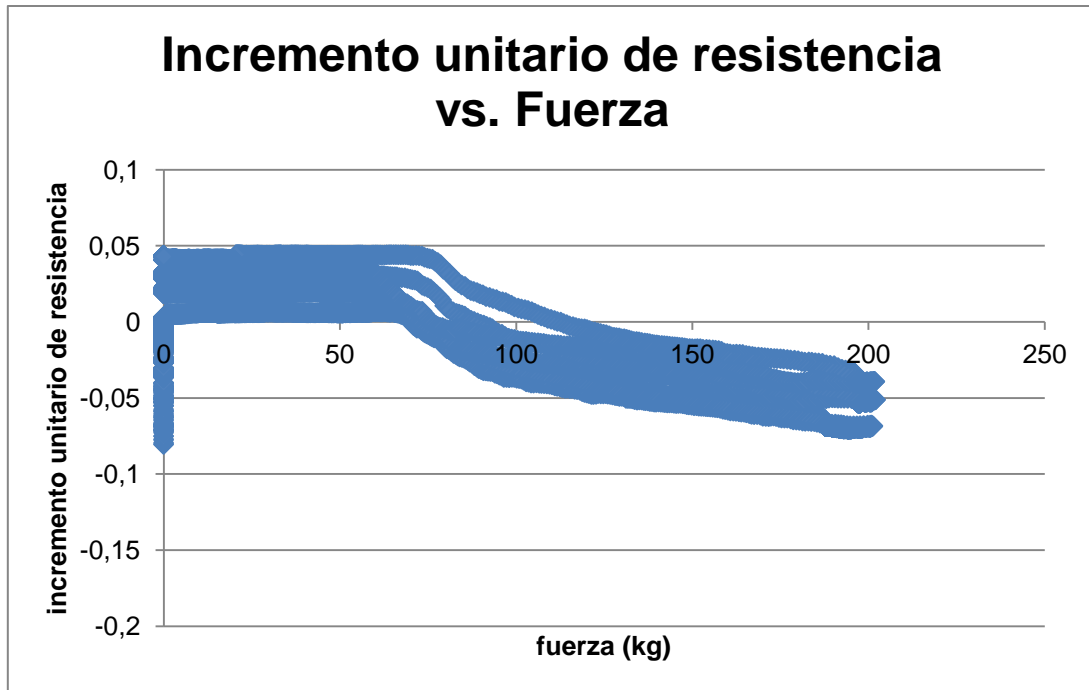


**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

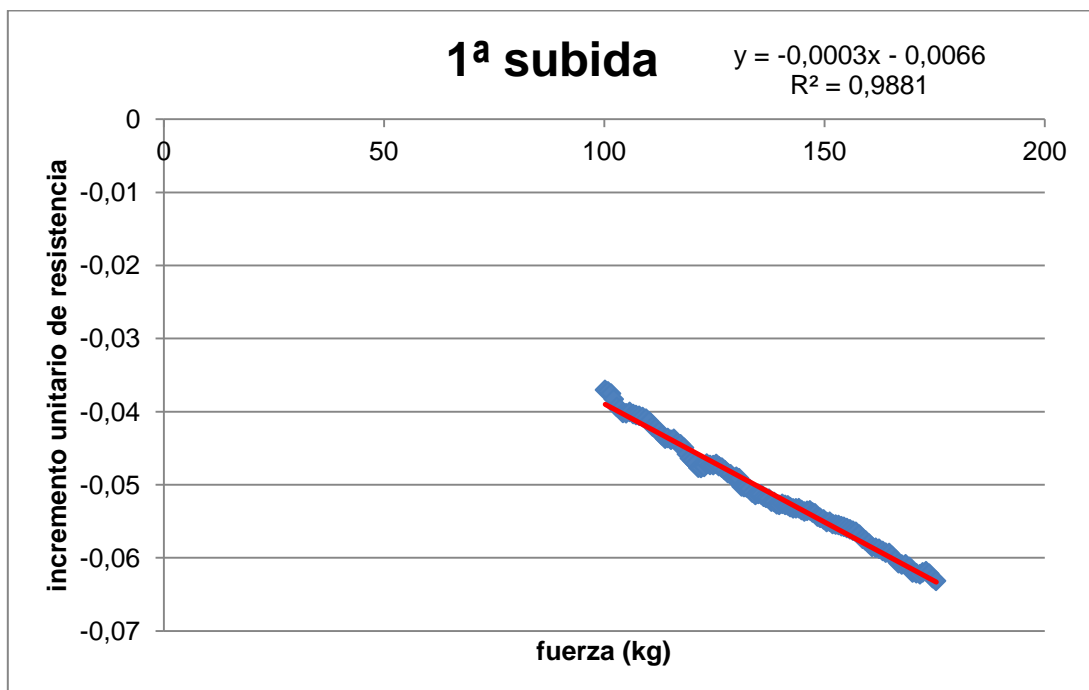
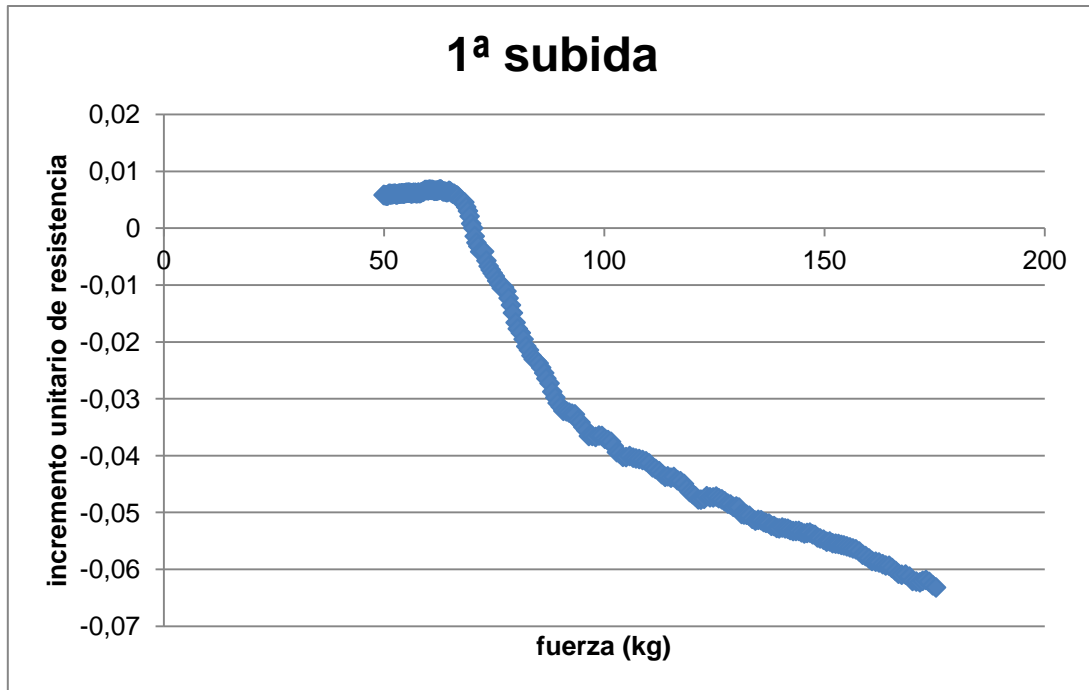




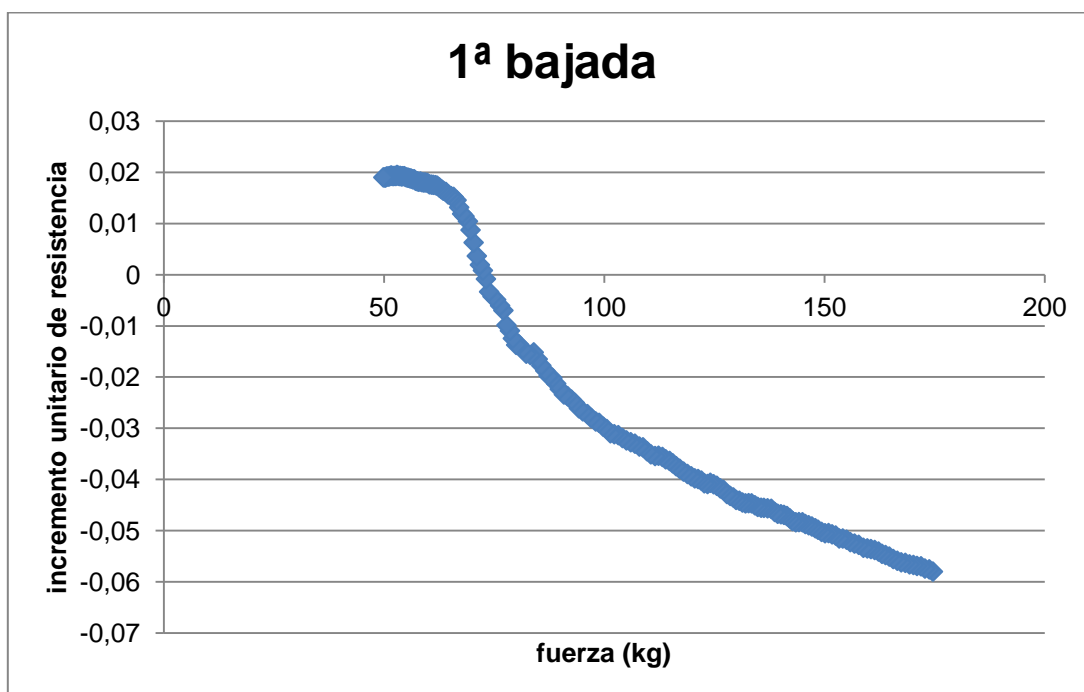
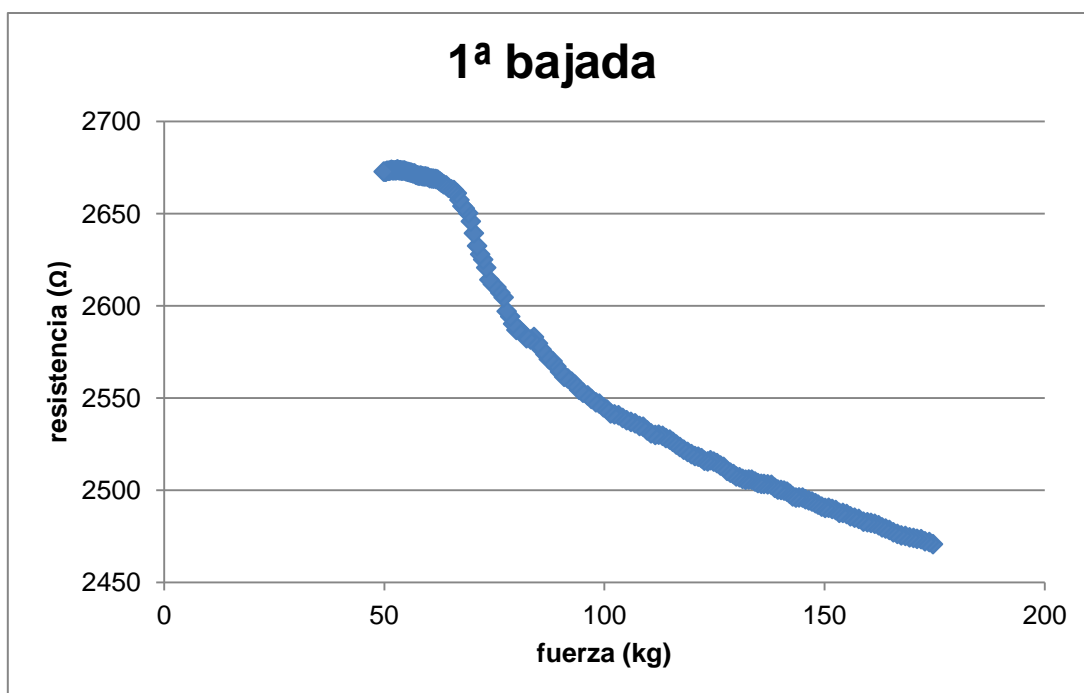
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



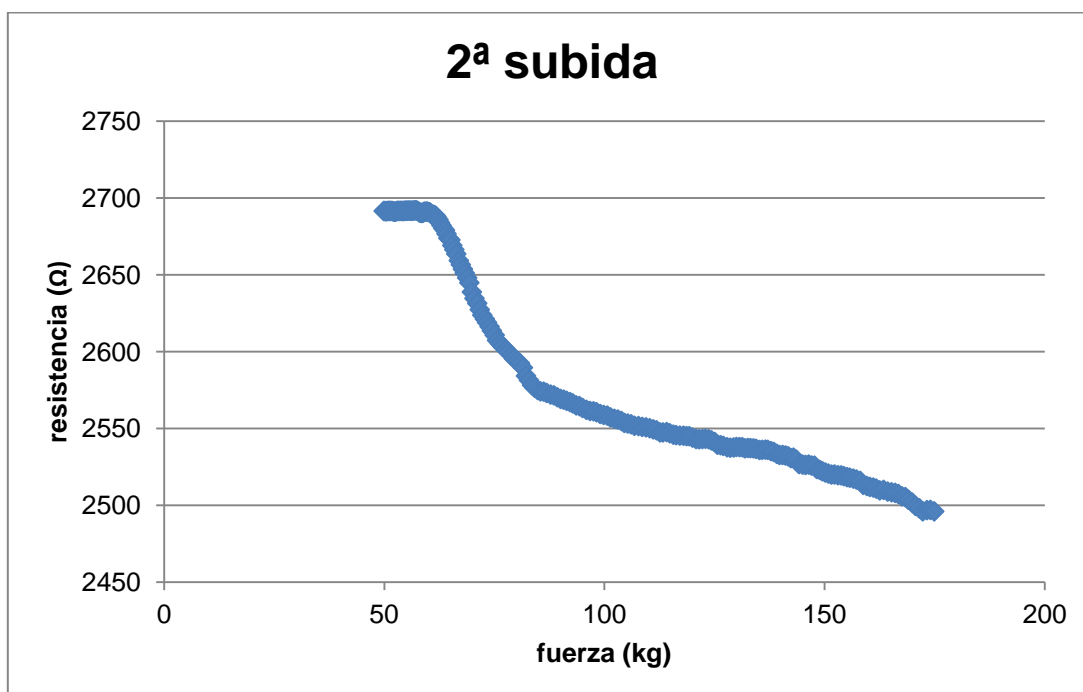
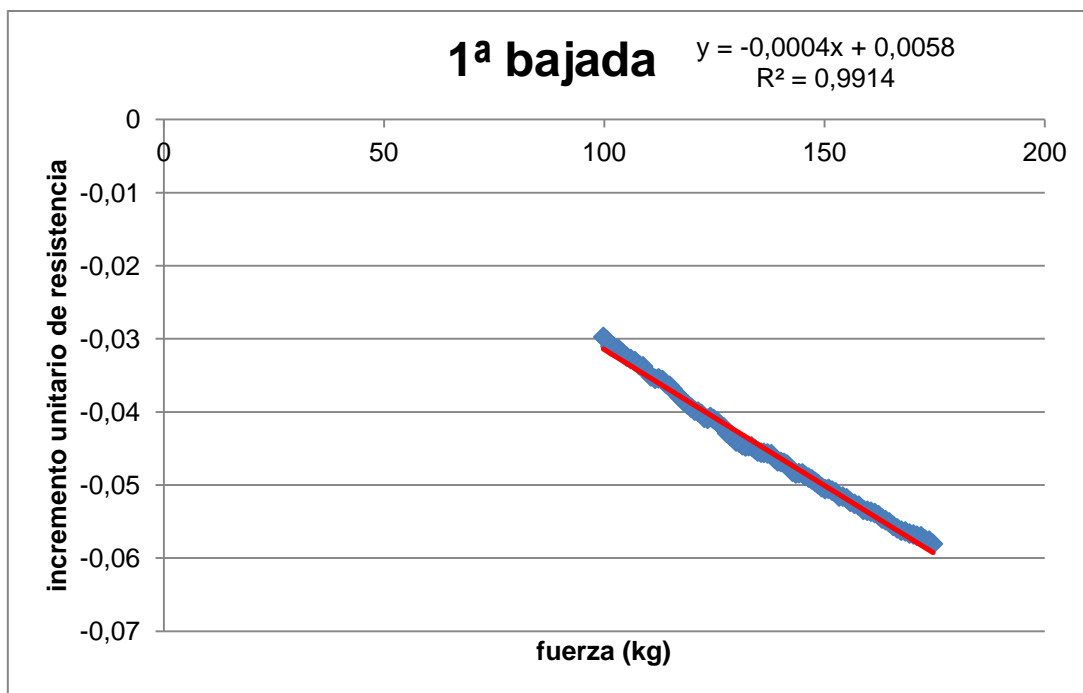
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



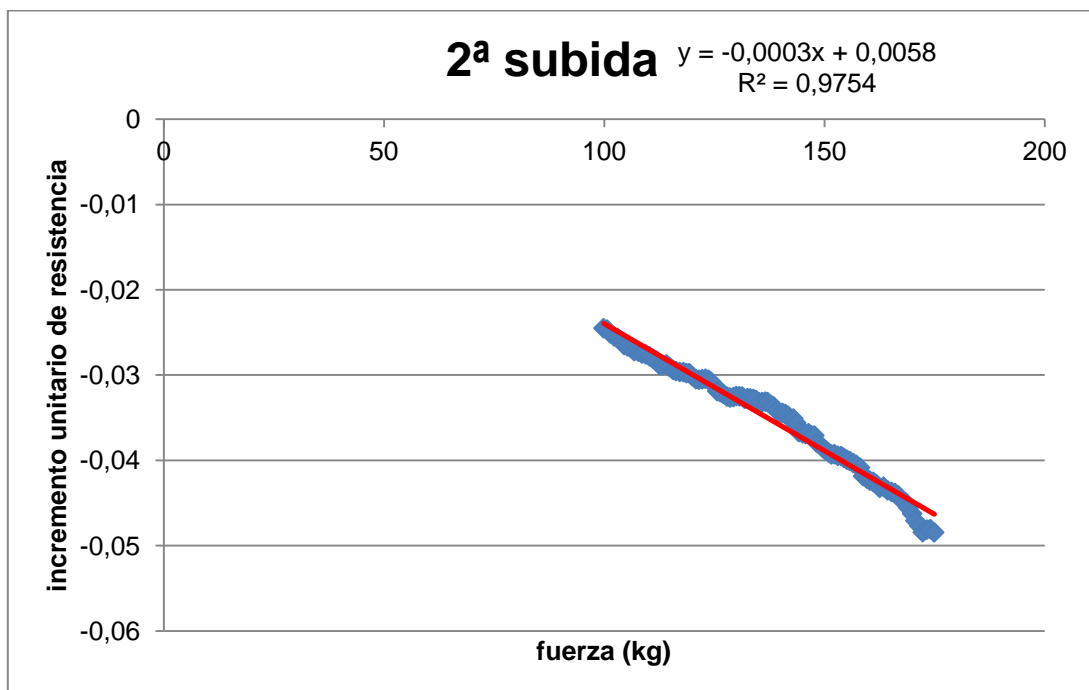
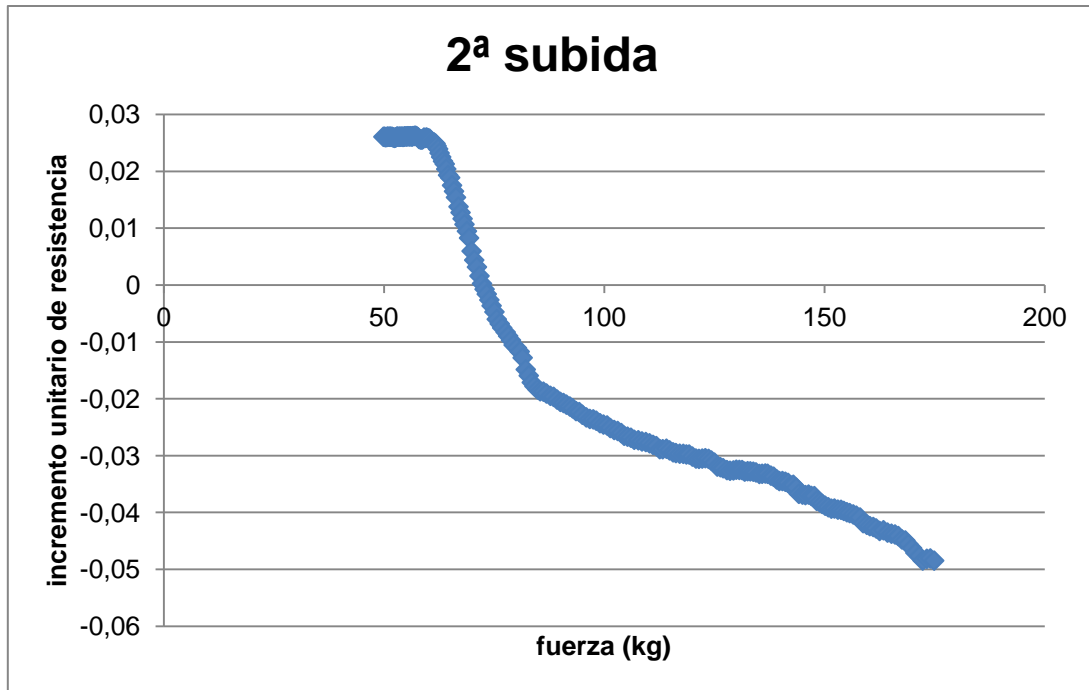
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



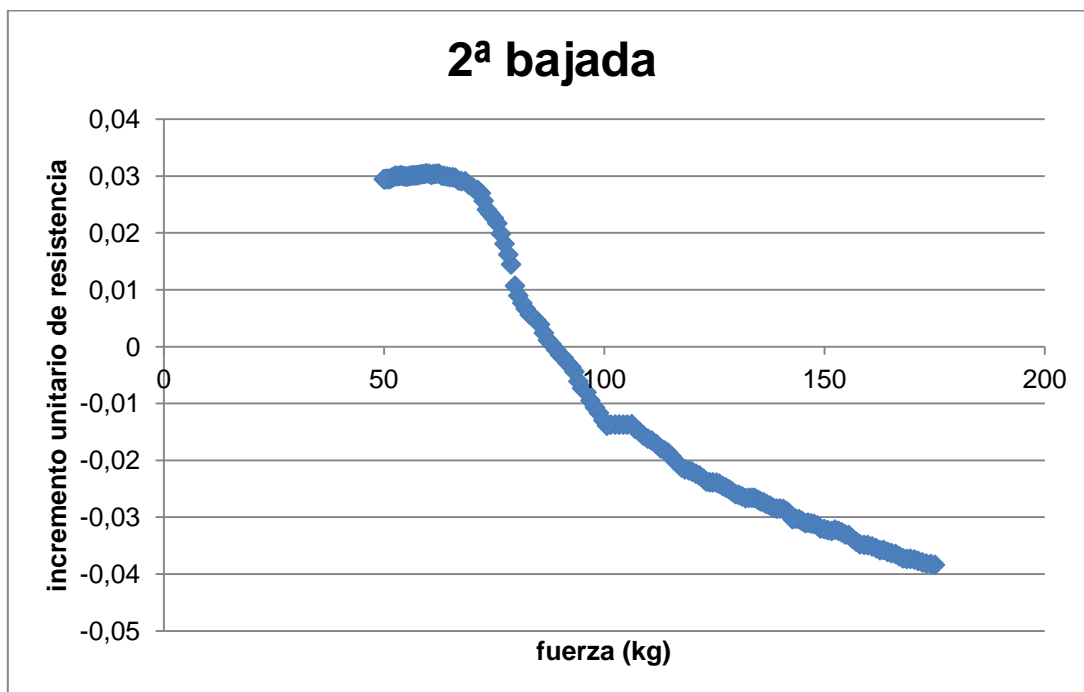
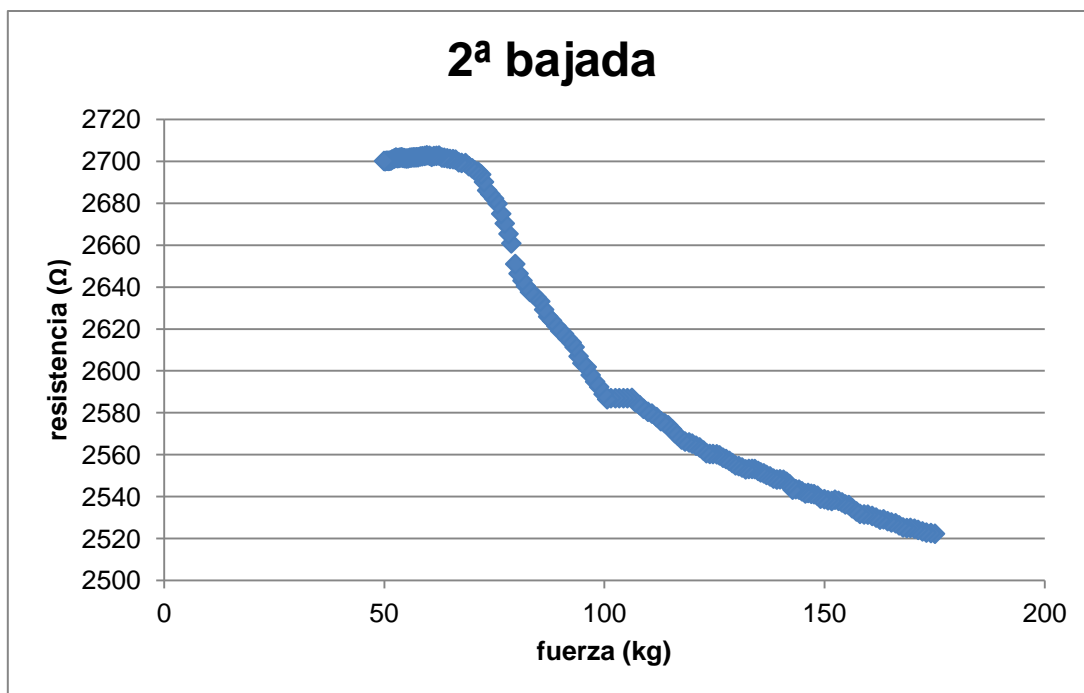
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



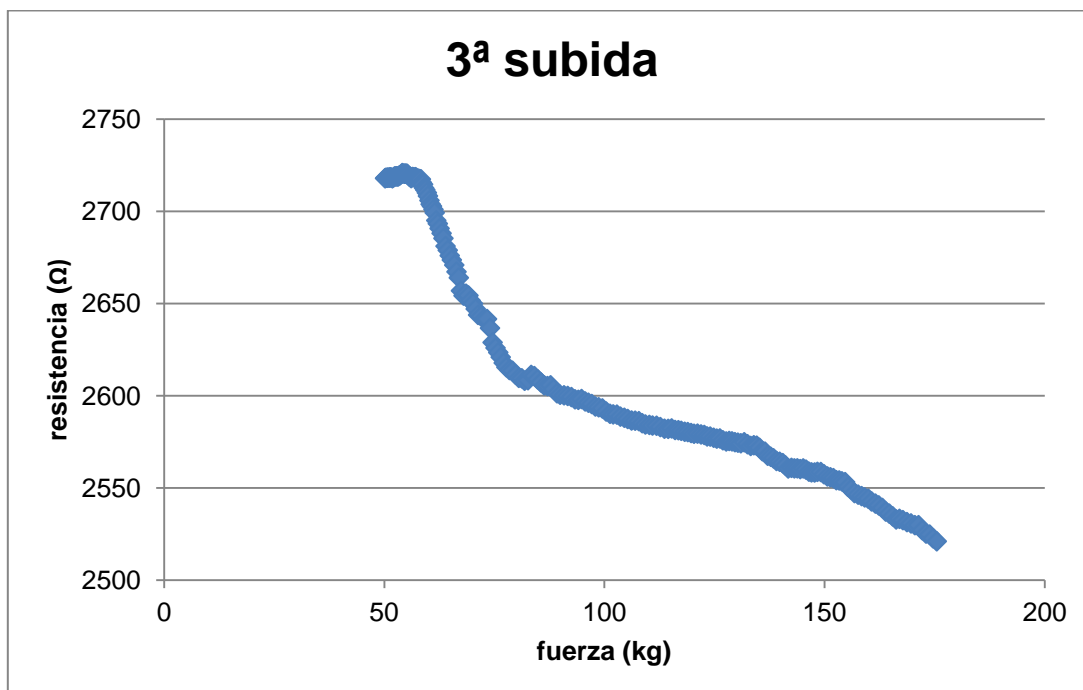
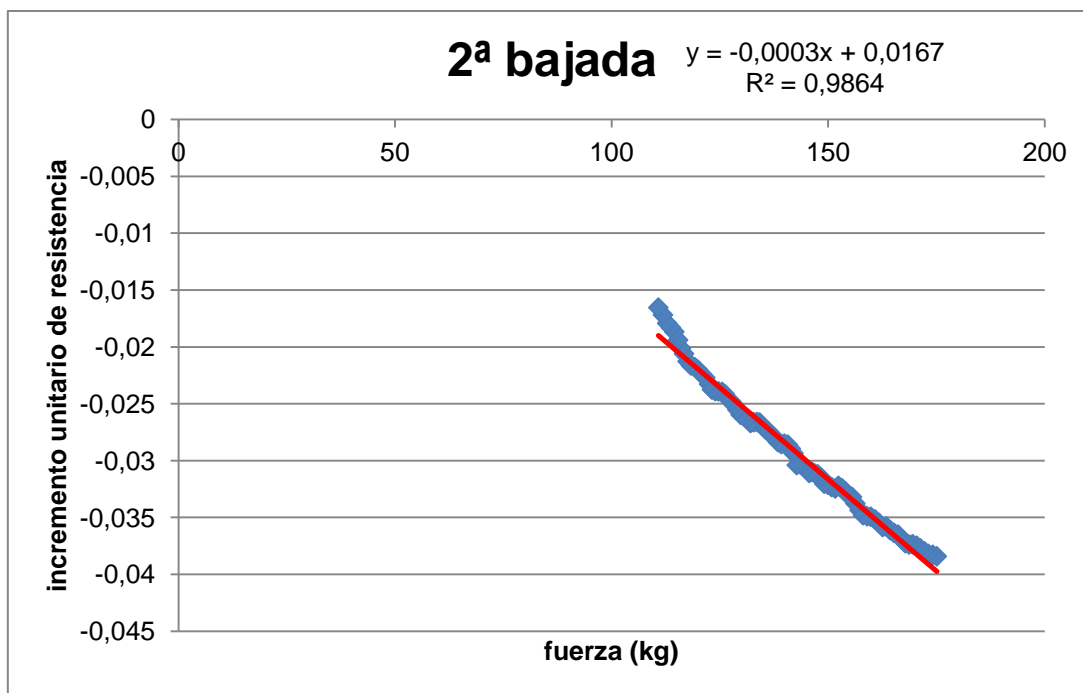
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



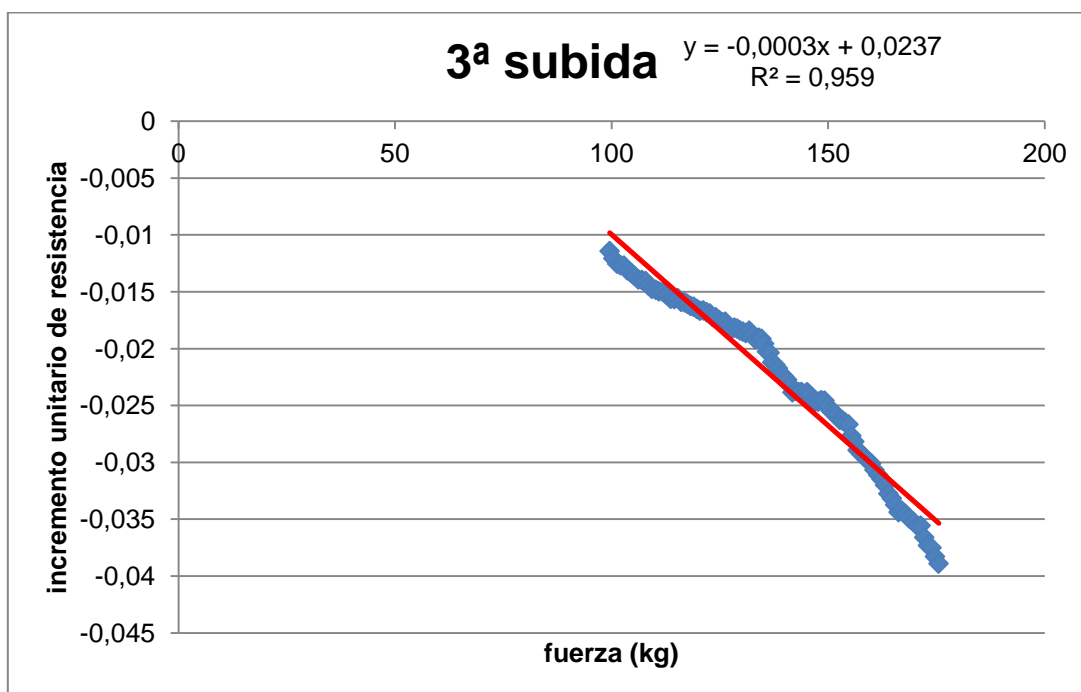
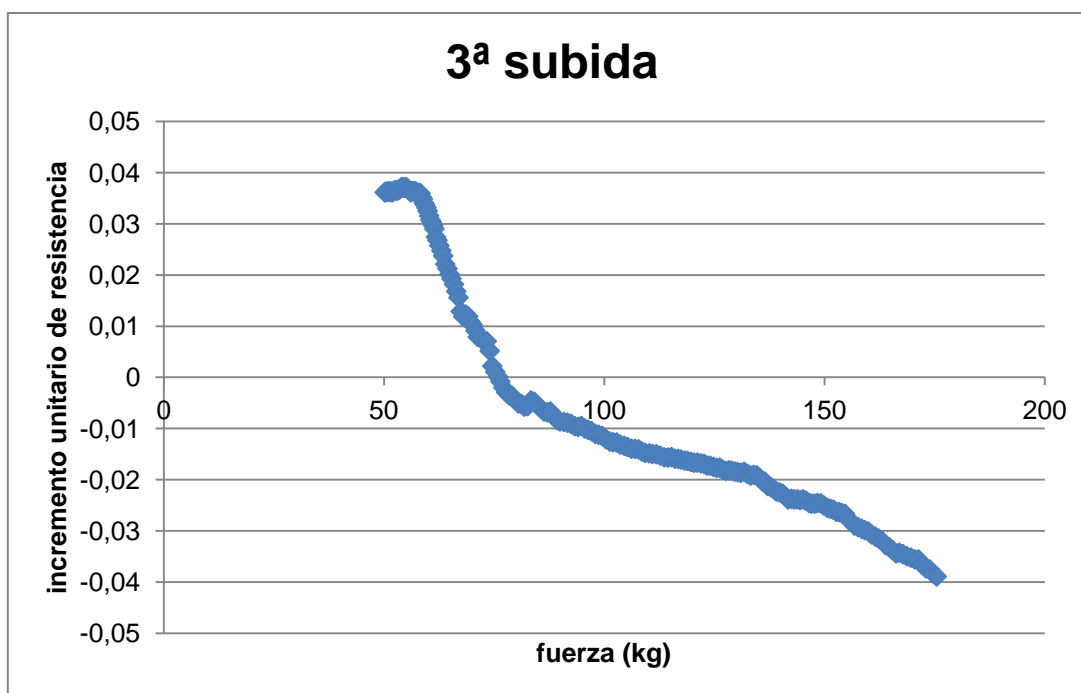
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

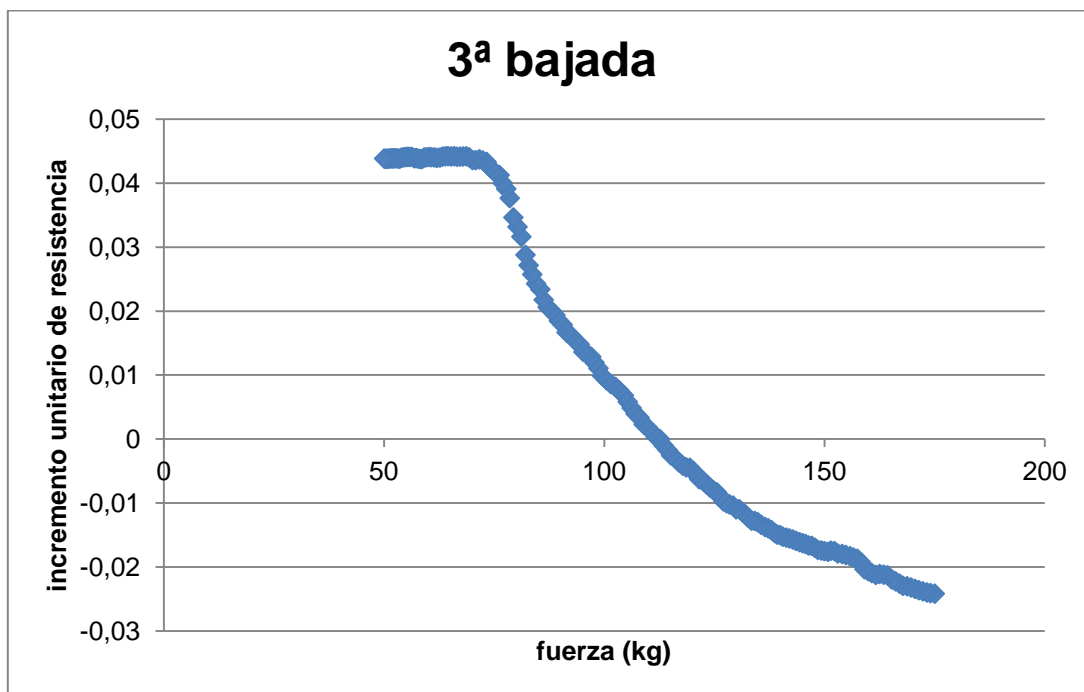
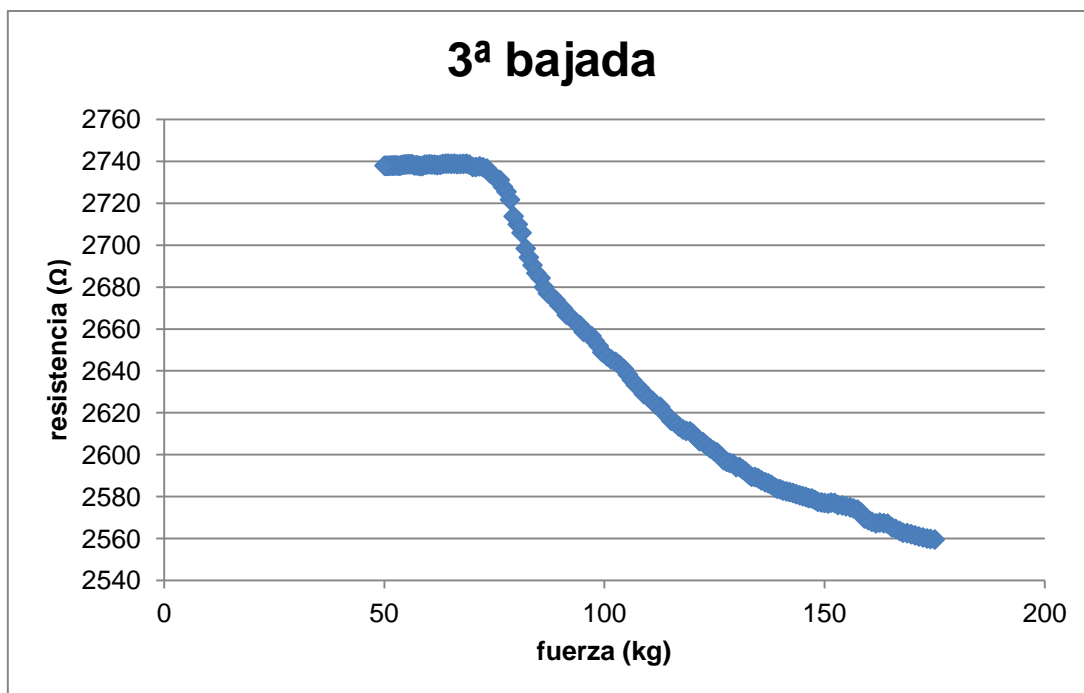


**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

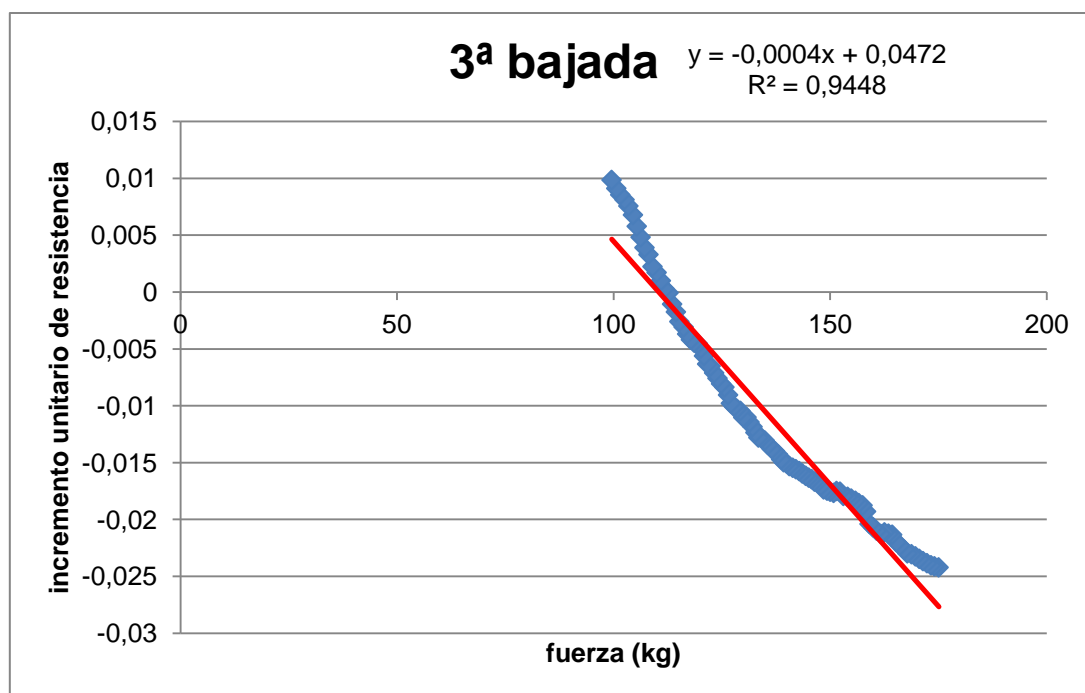




**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

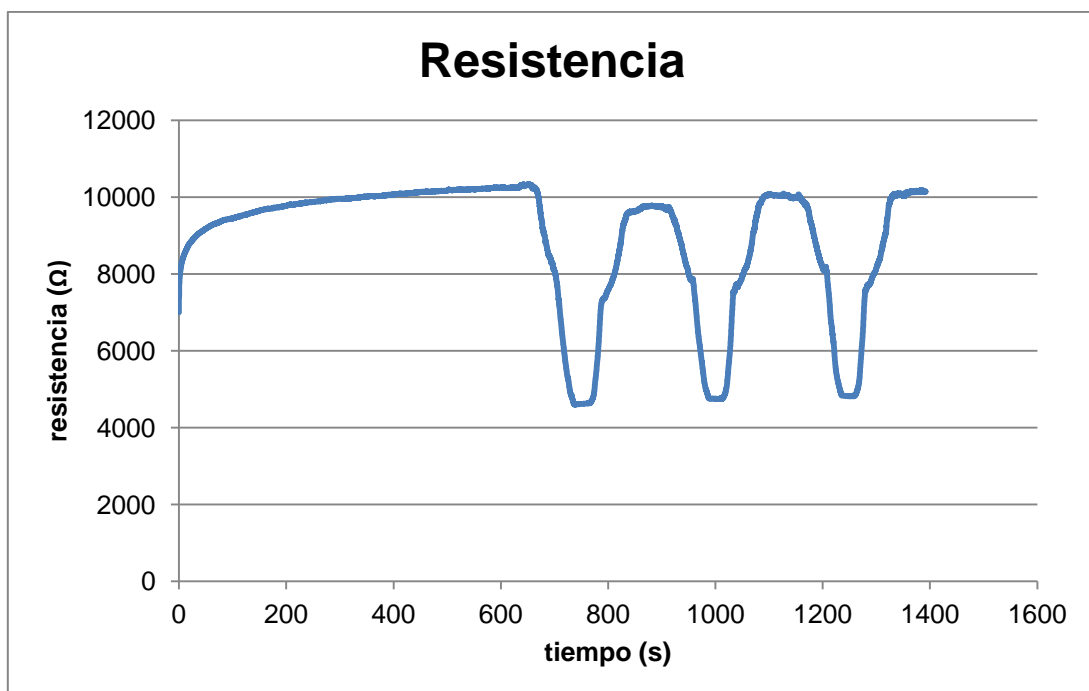
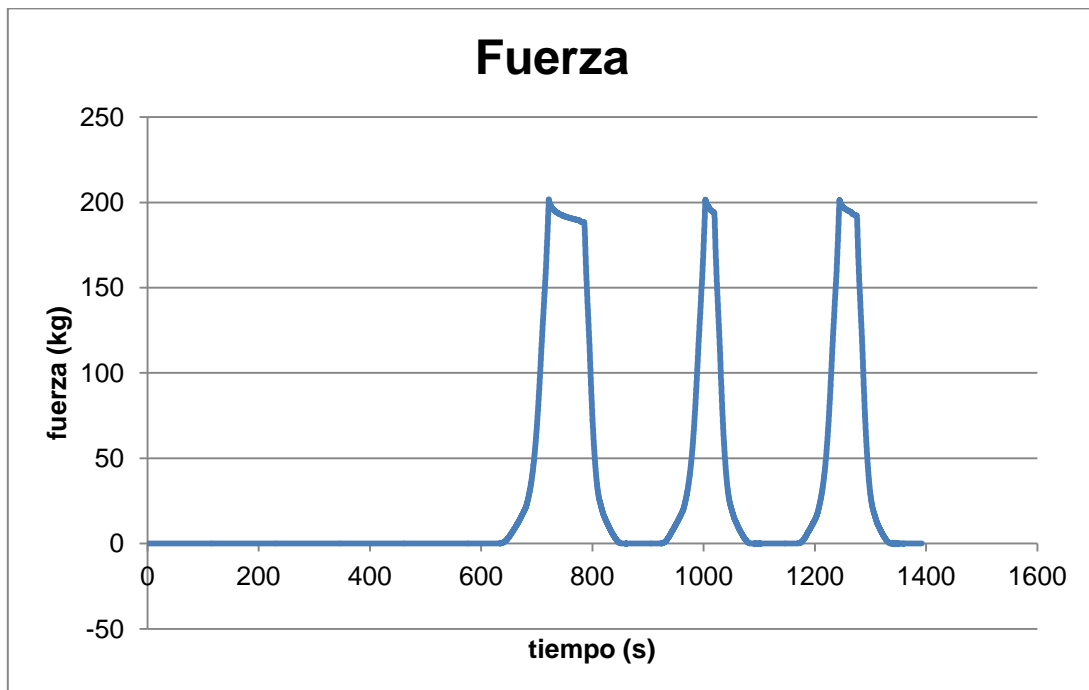


**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

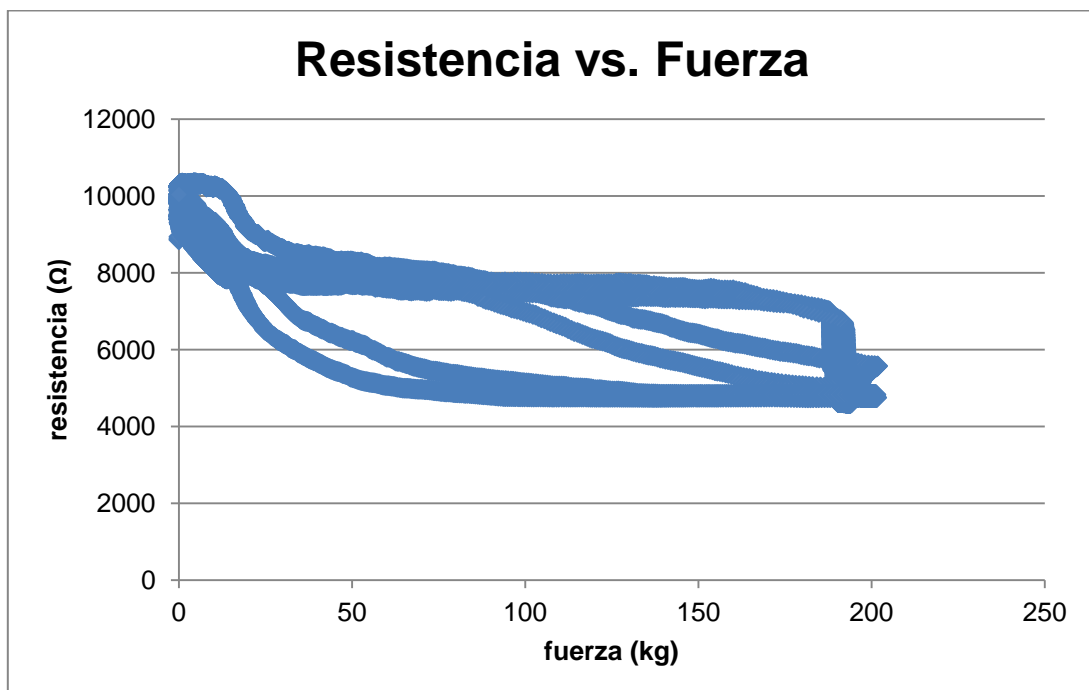
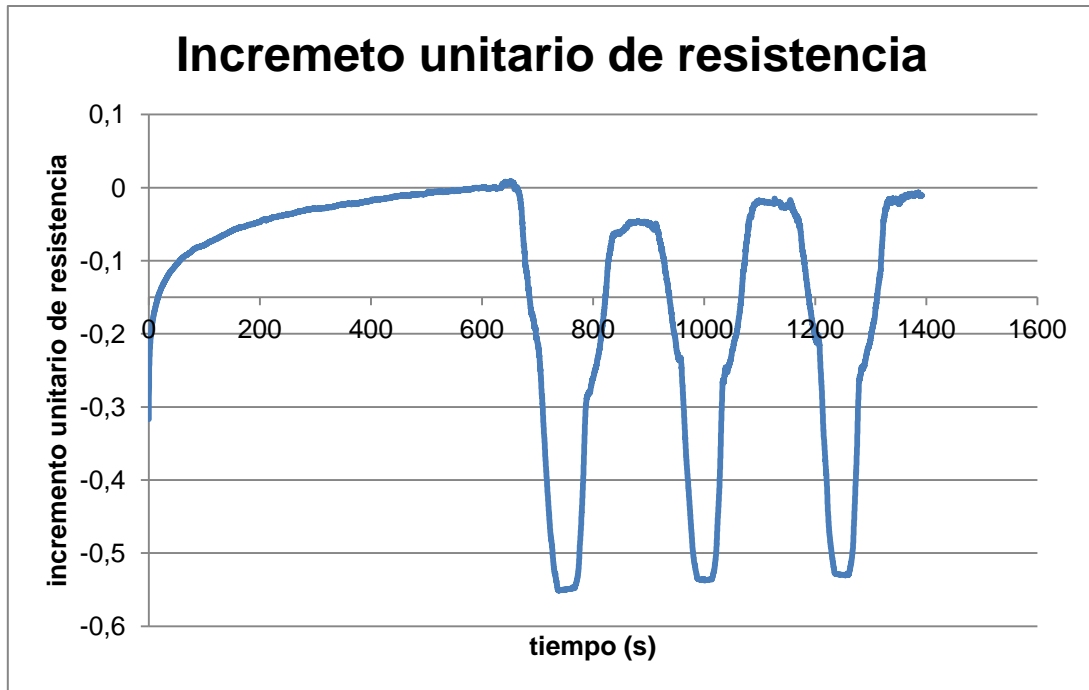


**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

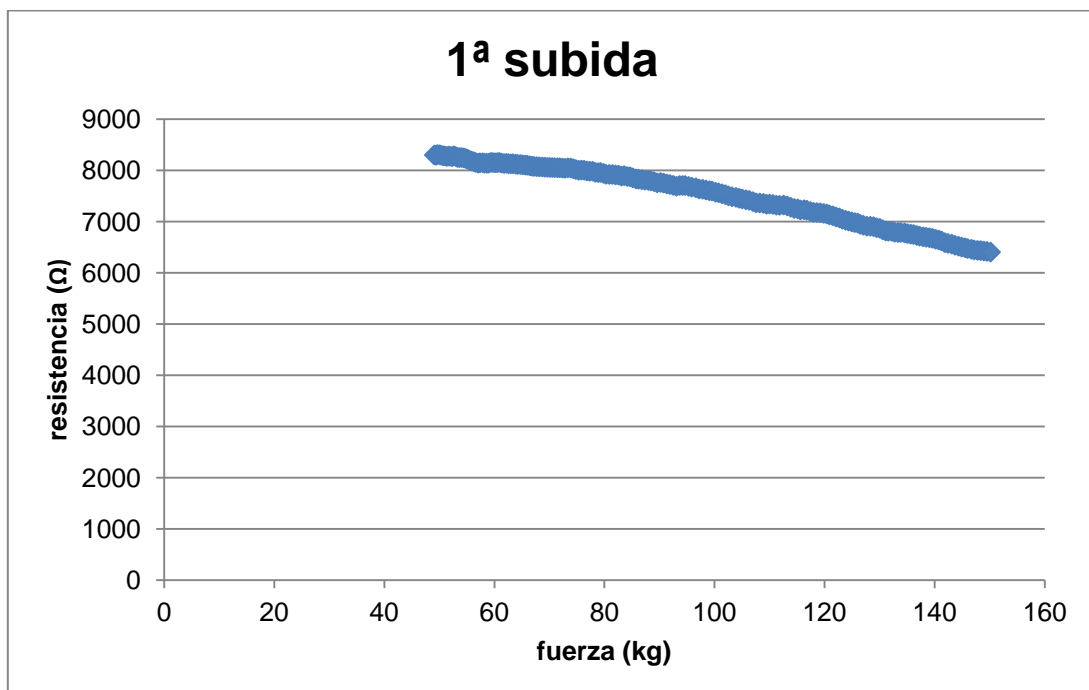
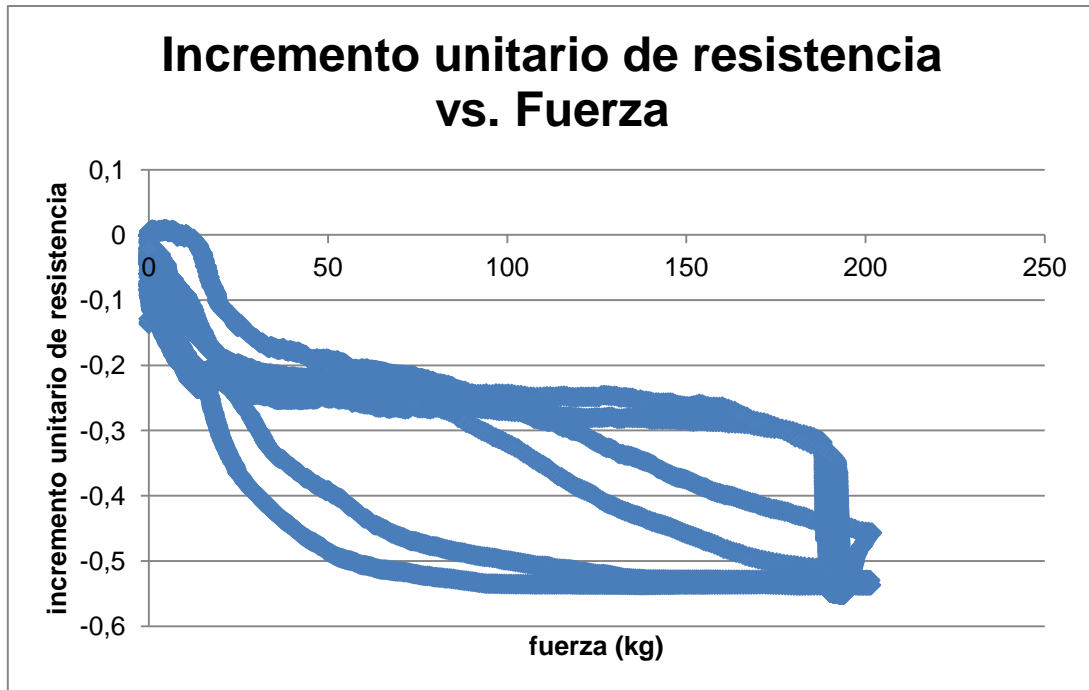
**2 Sensor 24**



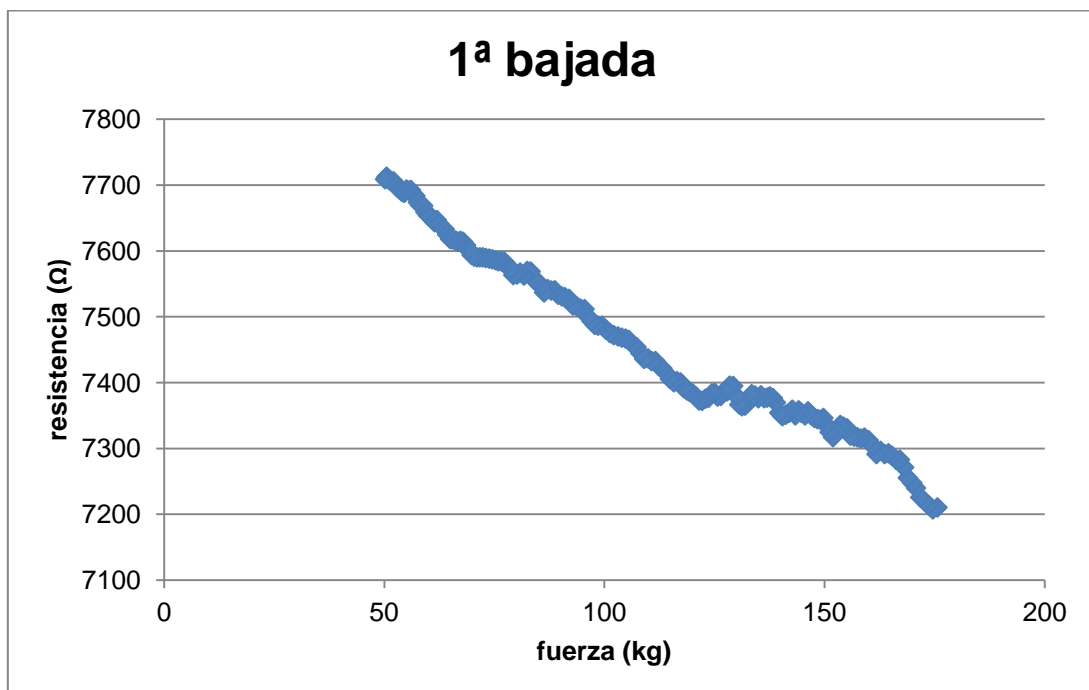
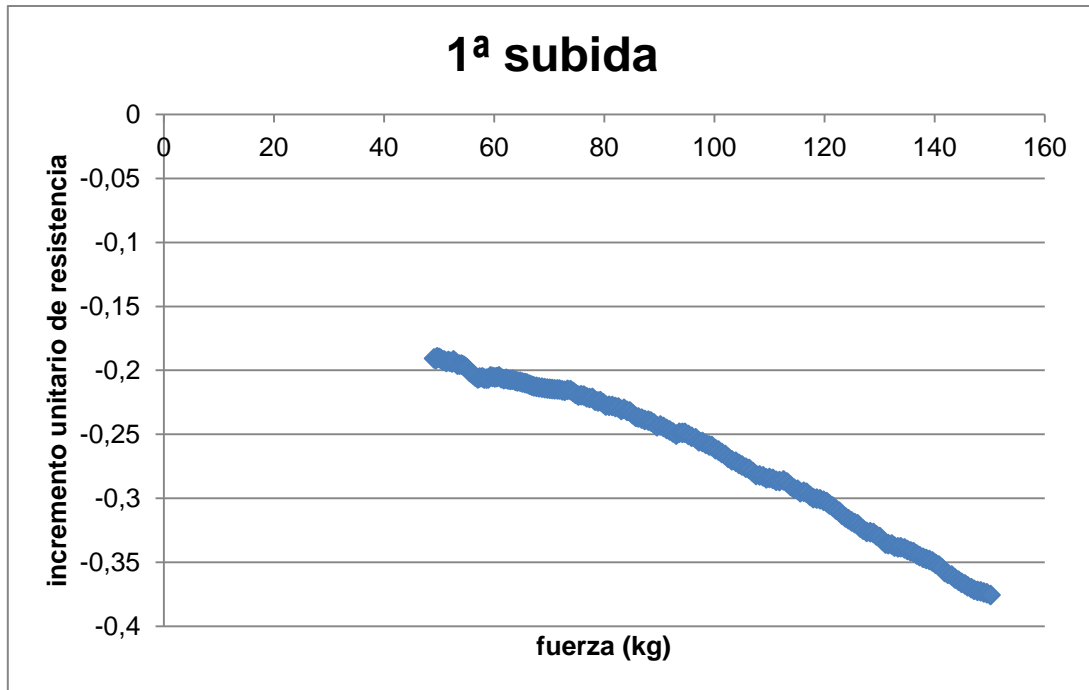
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



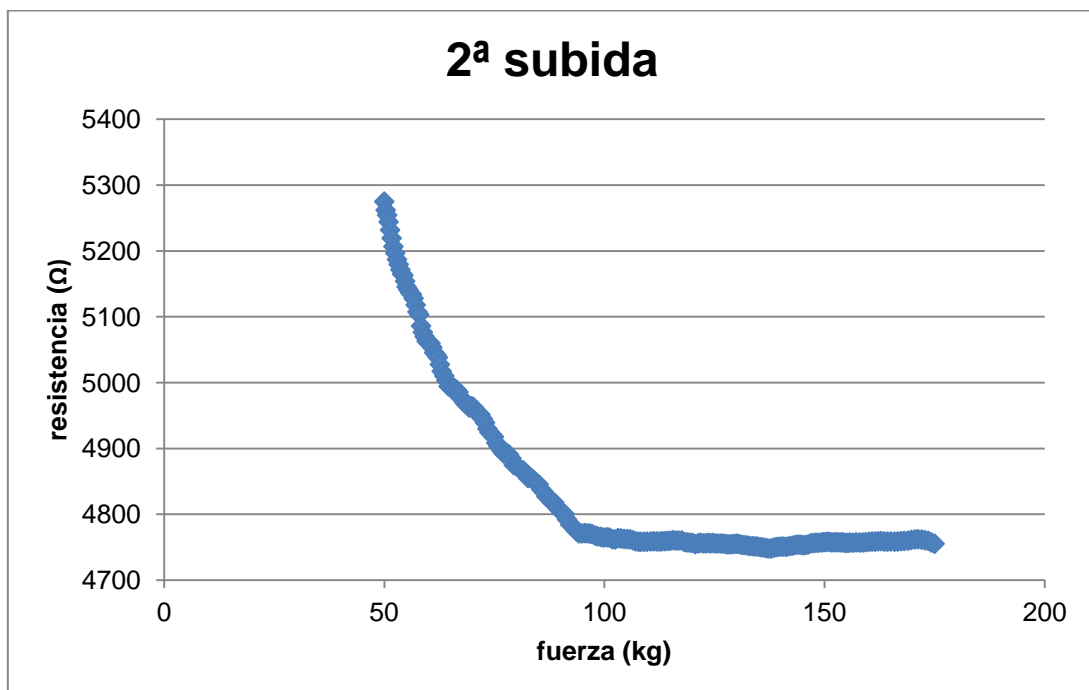
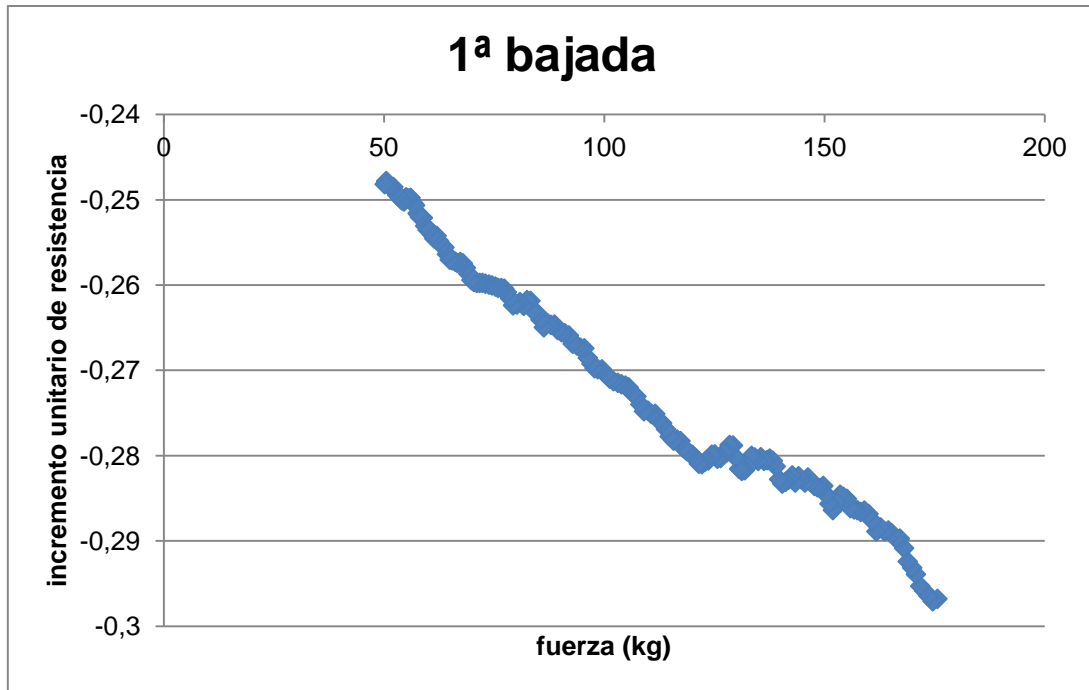
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



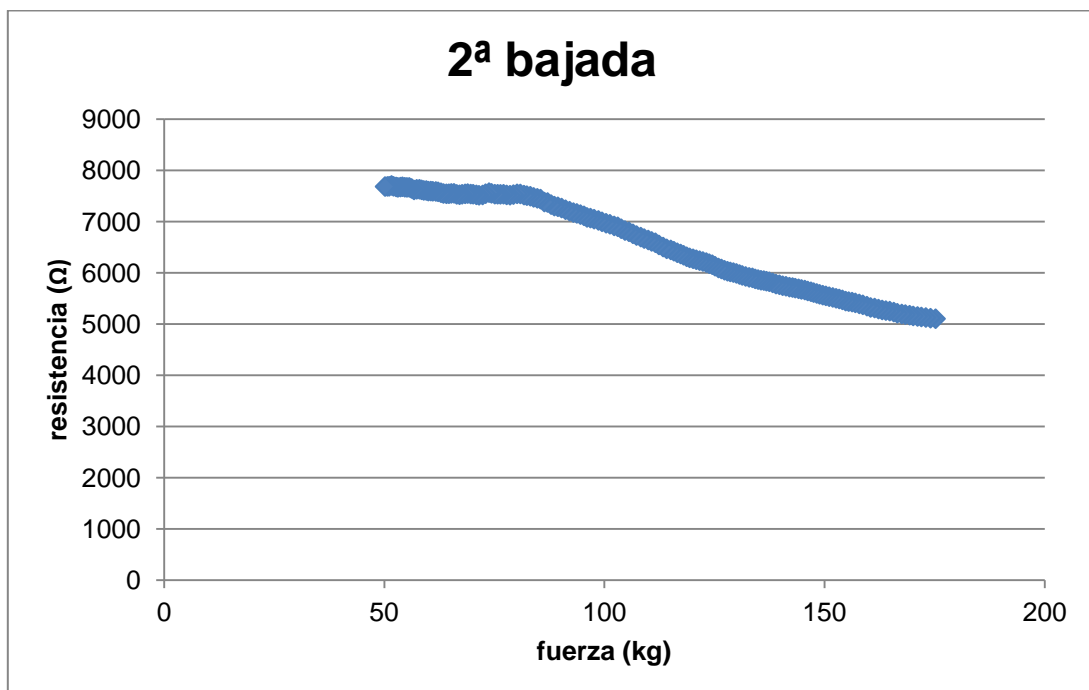
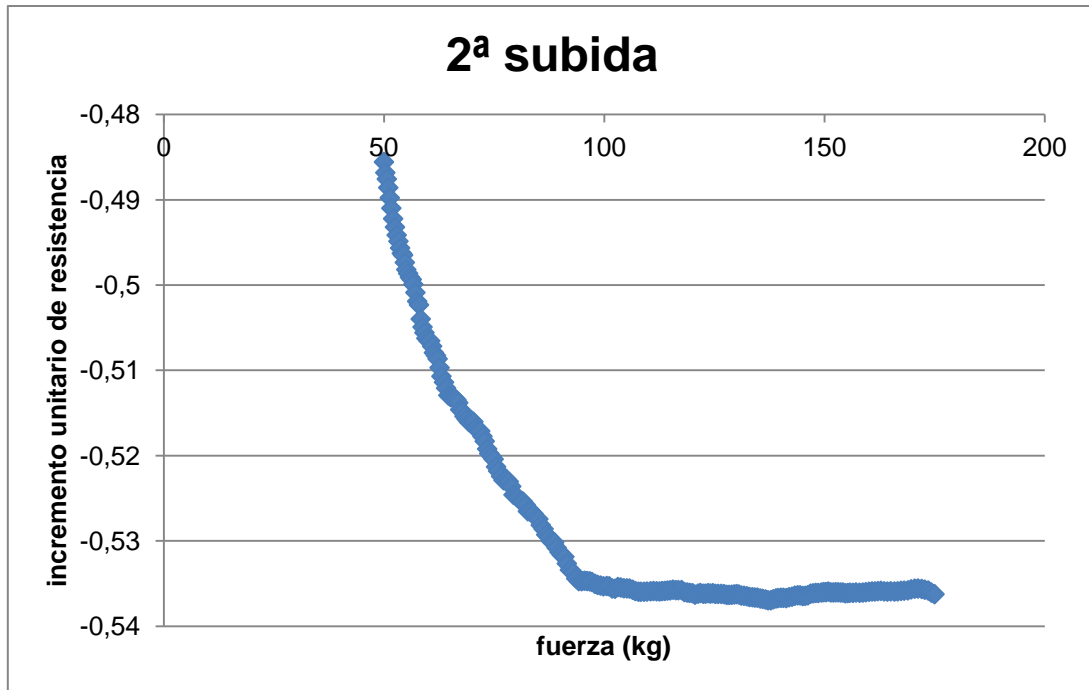
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

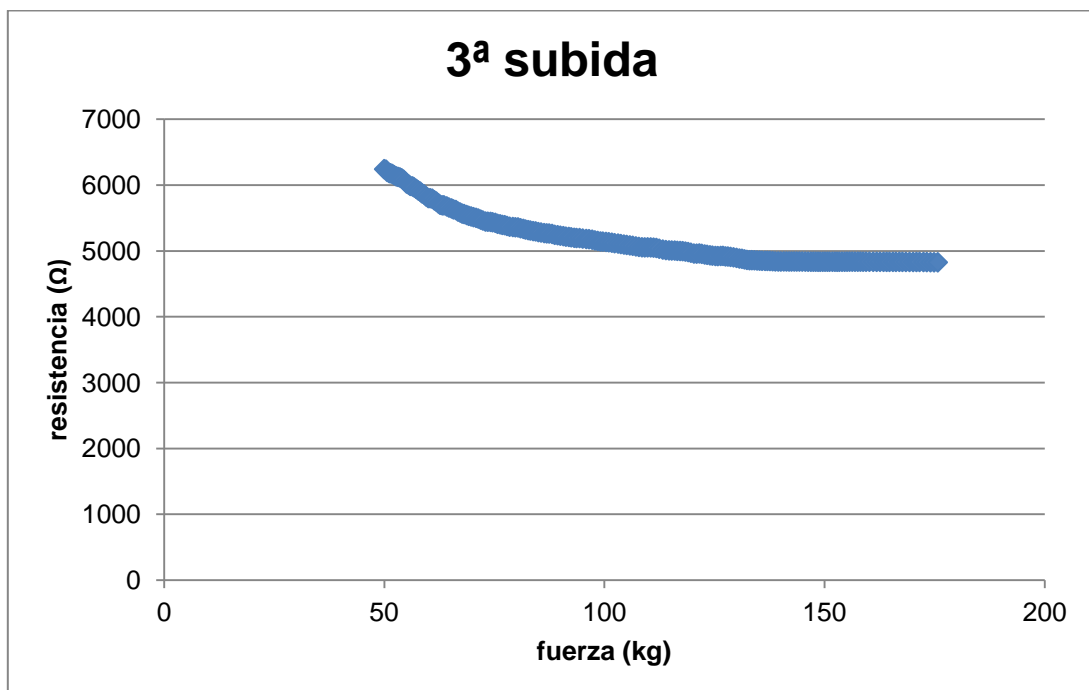
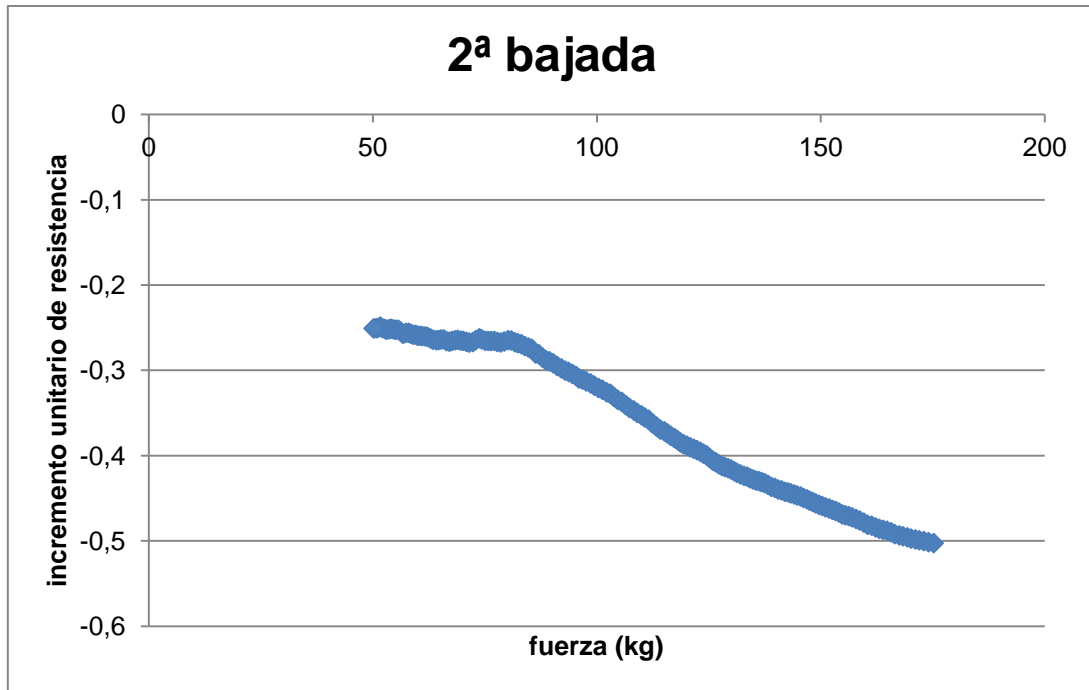


**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

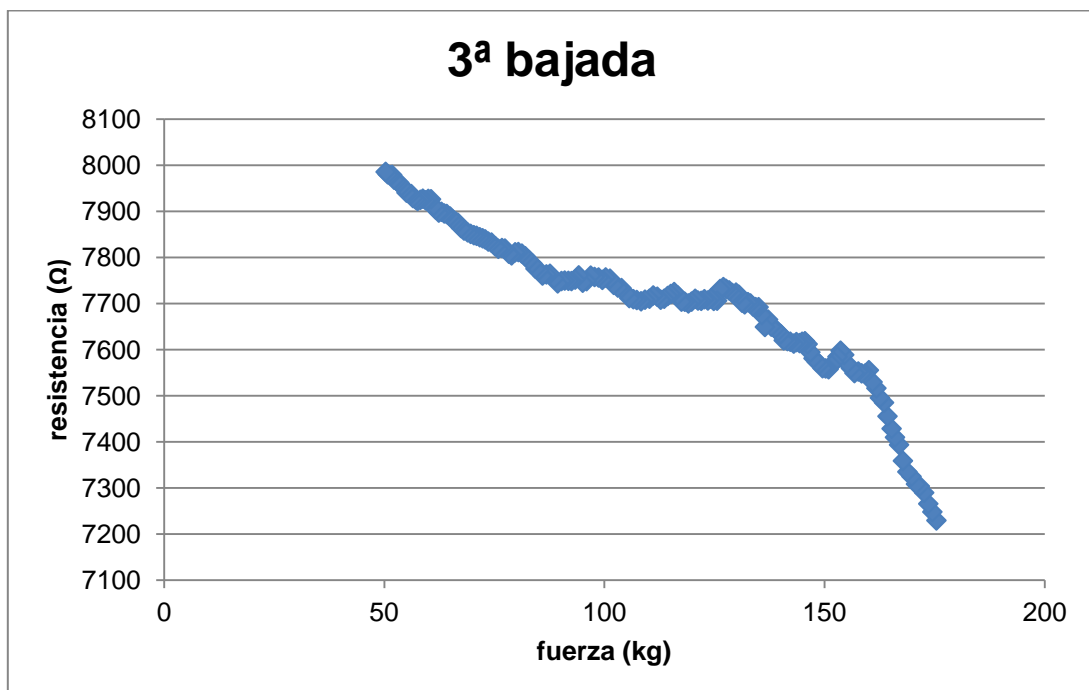
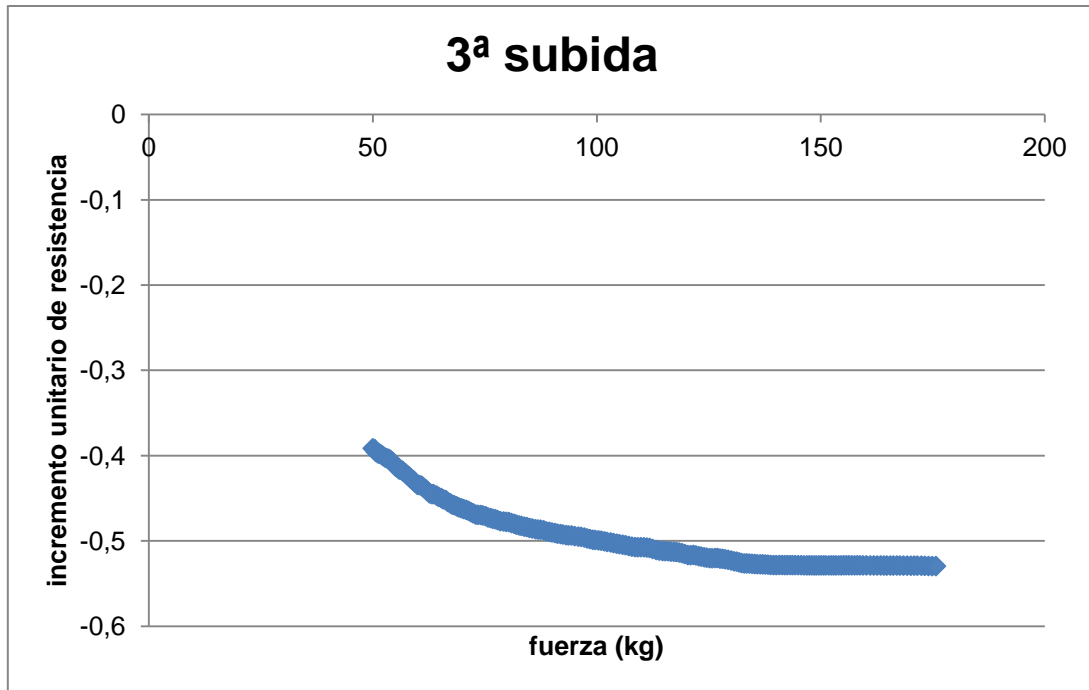




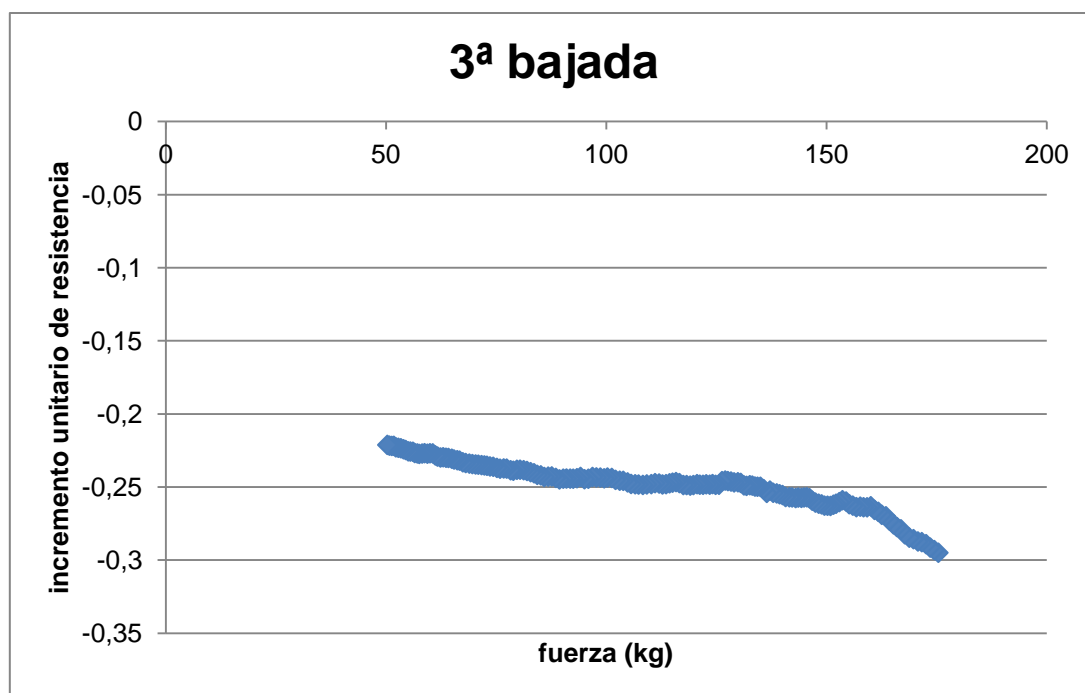
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



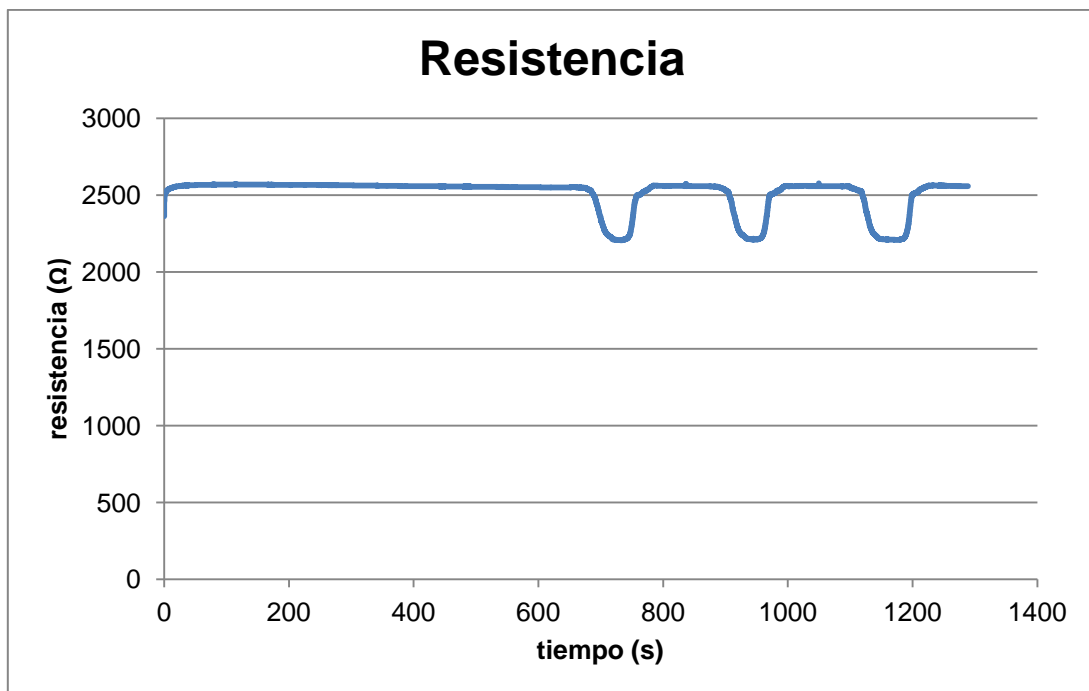
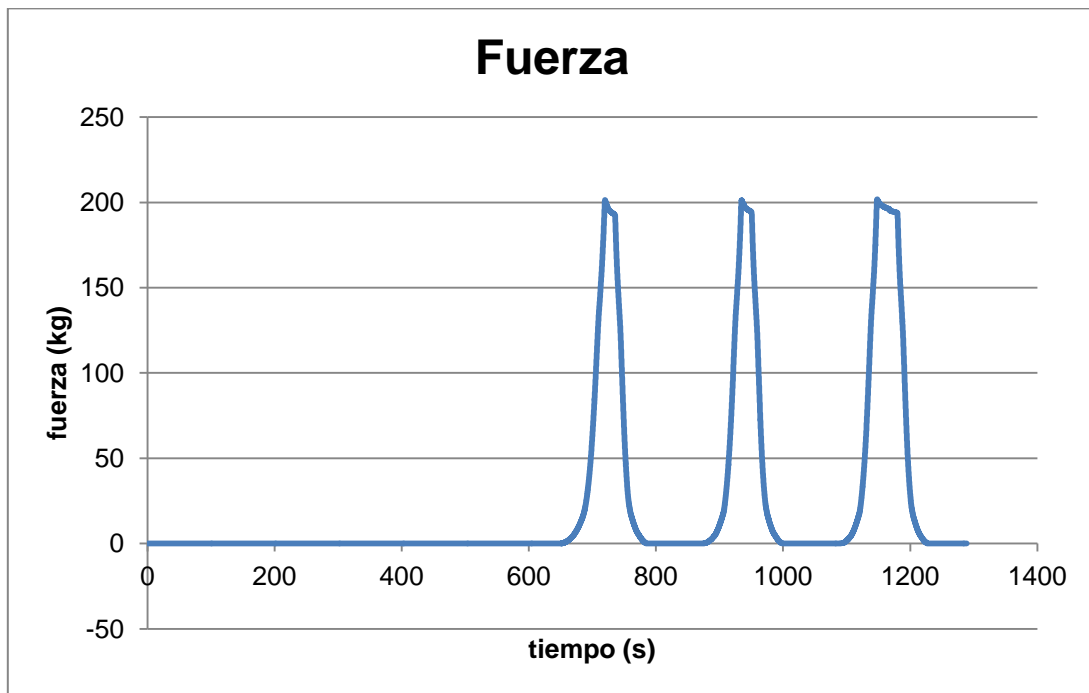
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



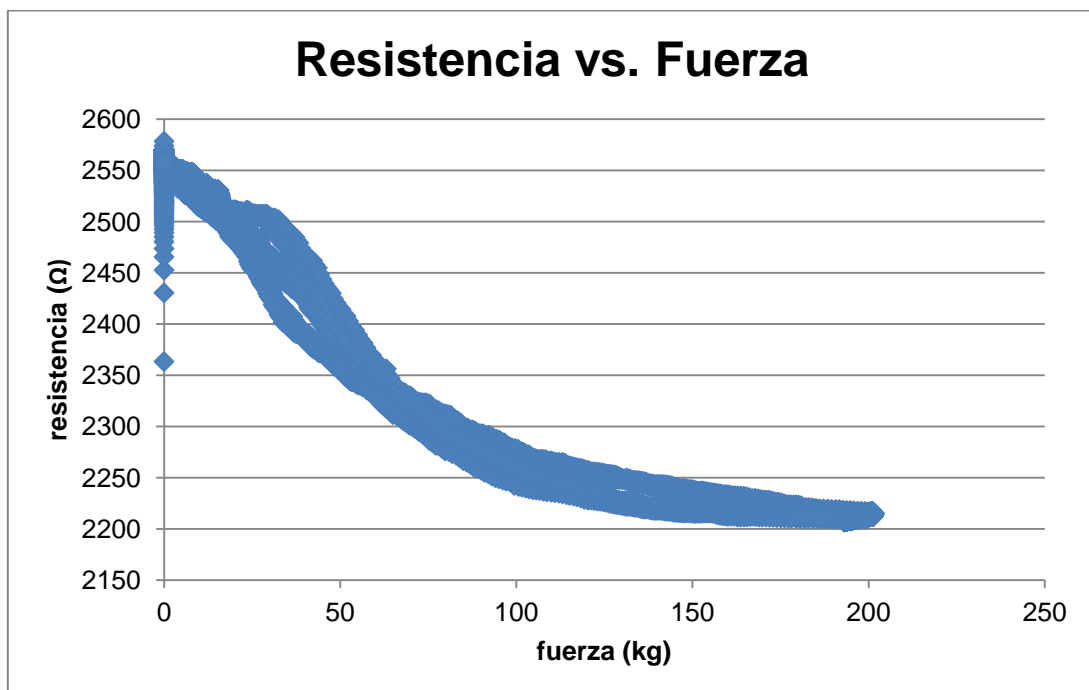
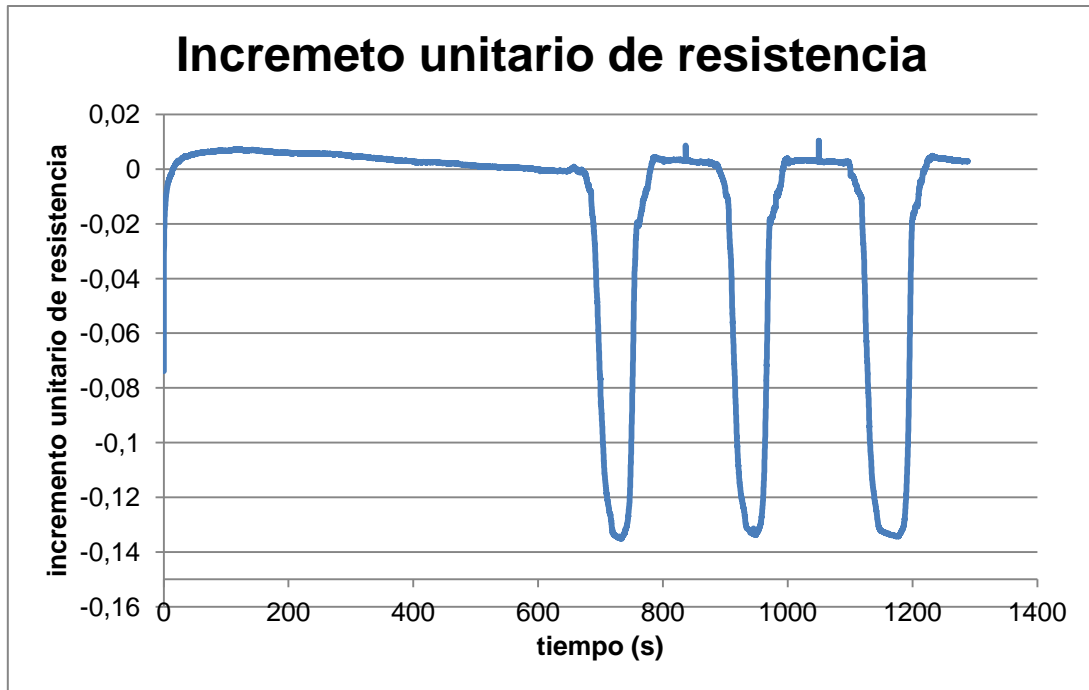
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



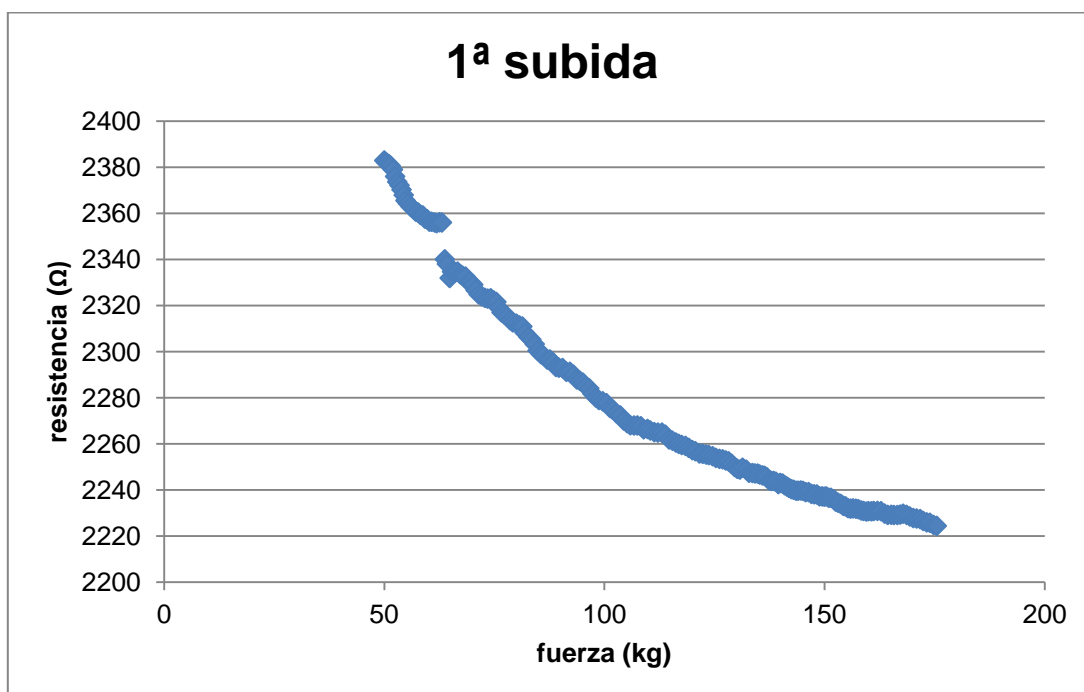
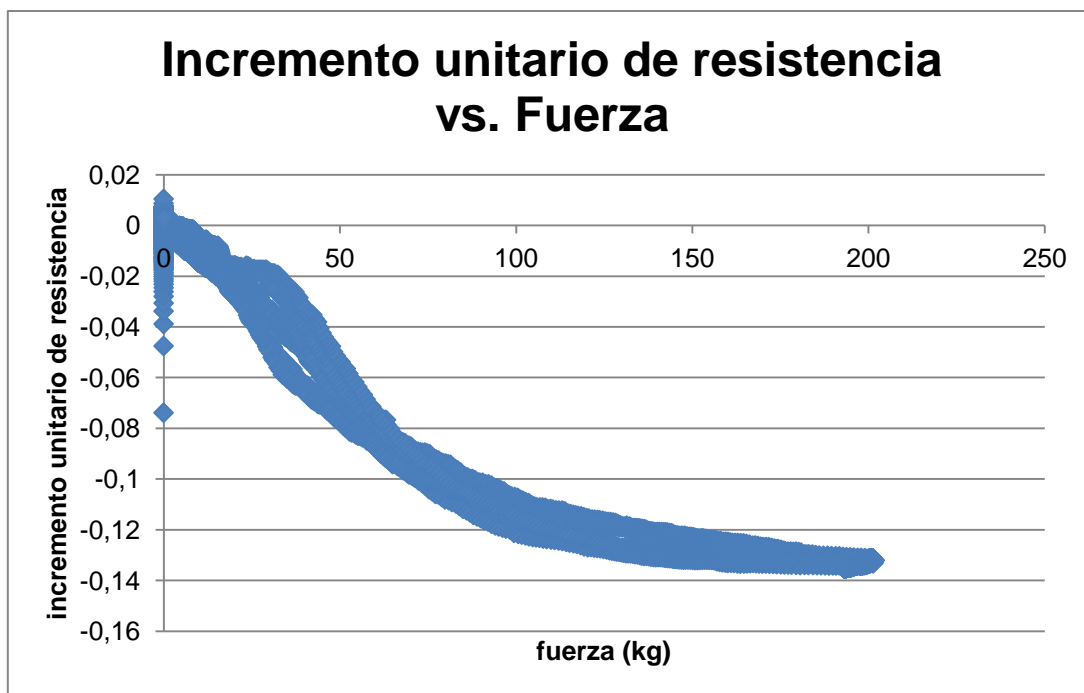
### 3 Sensor 33



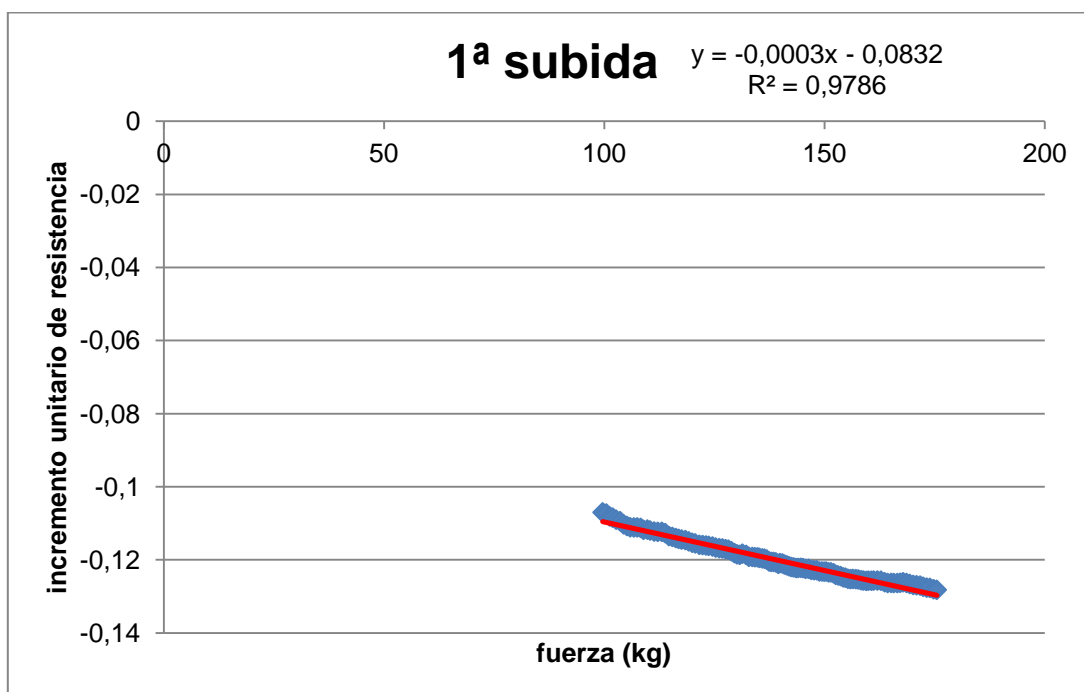
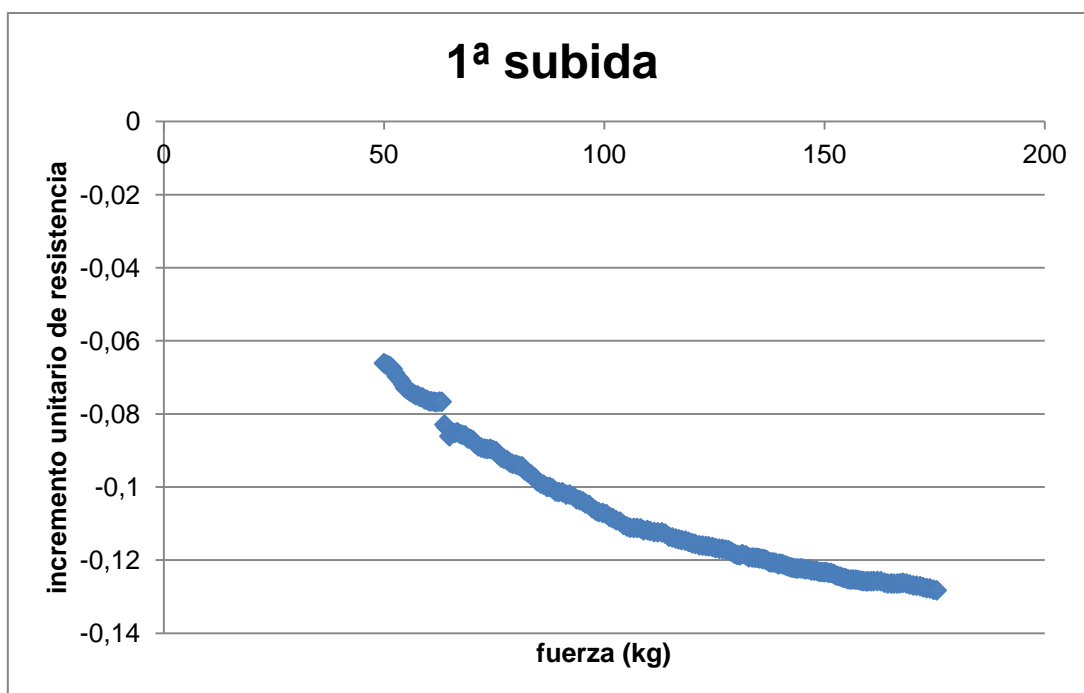
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



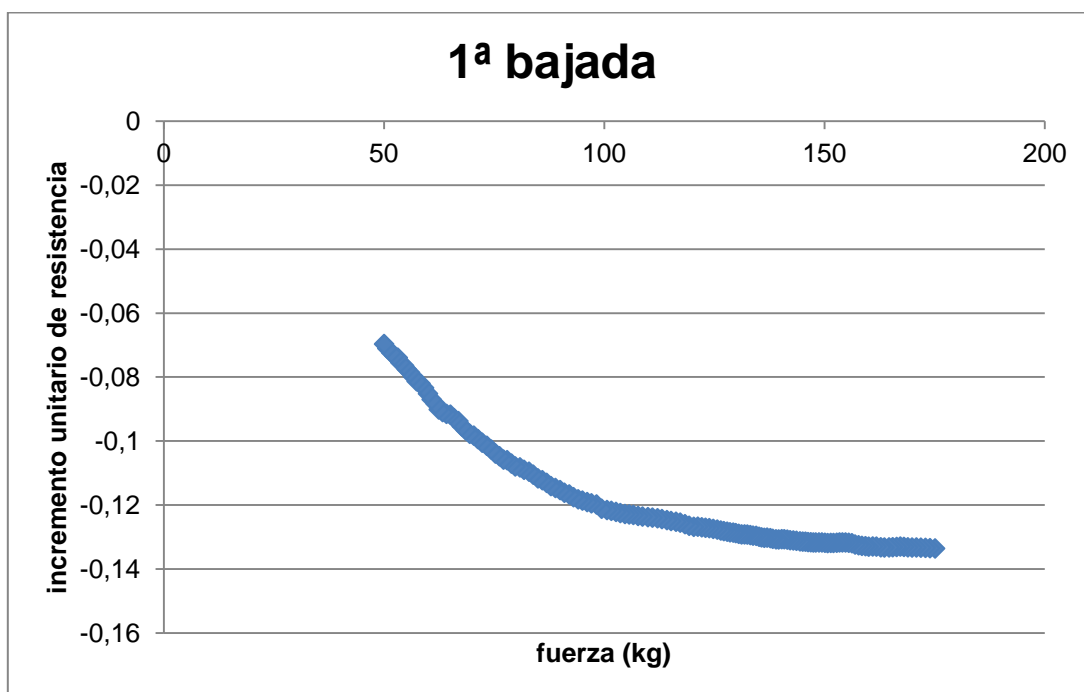
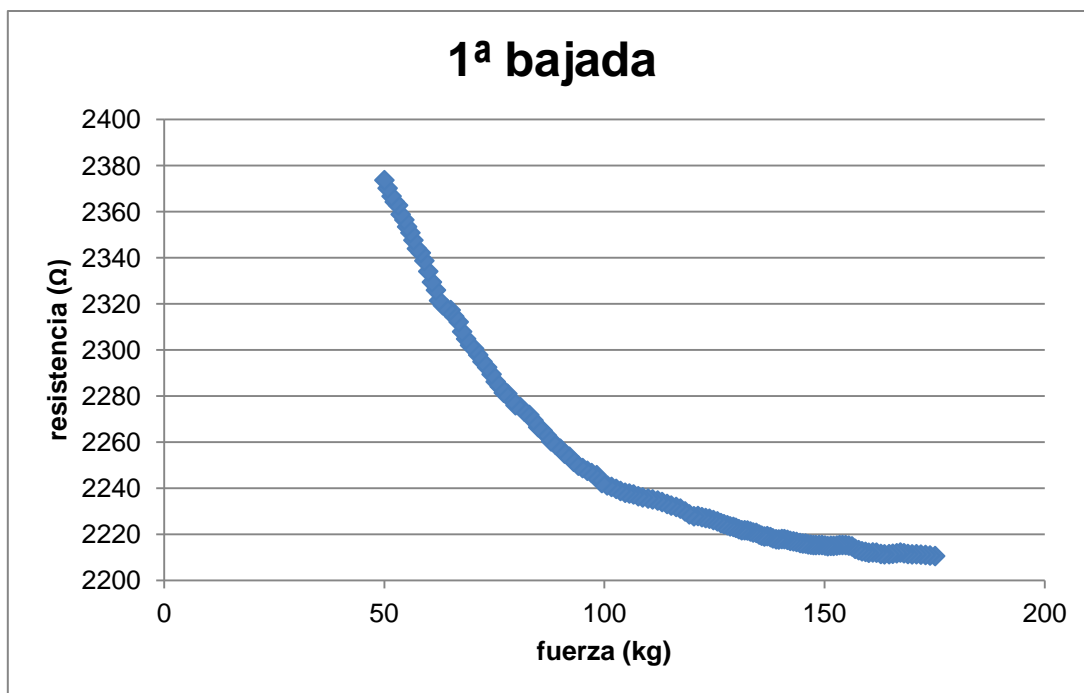
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

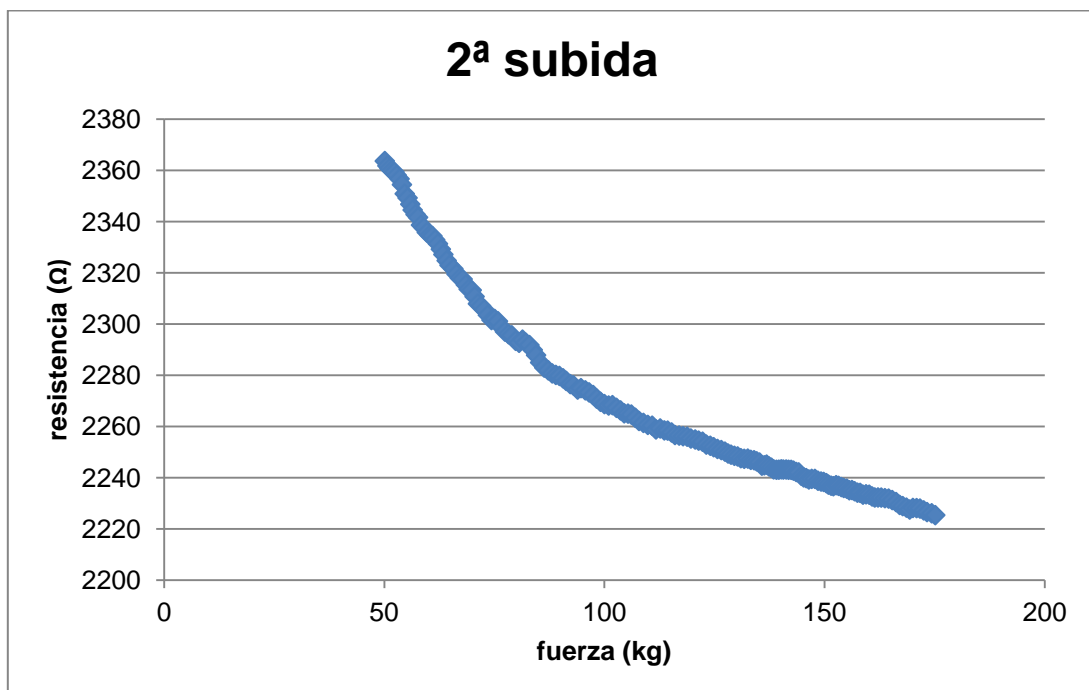
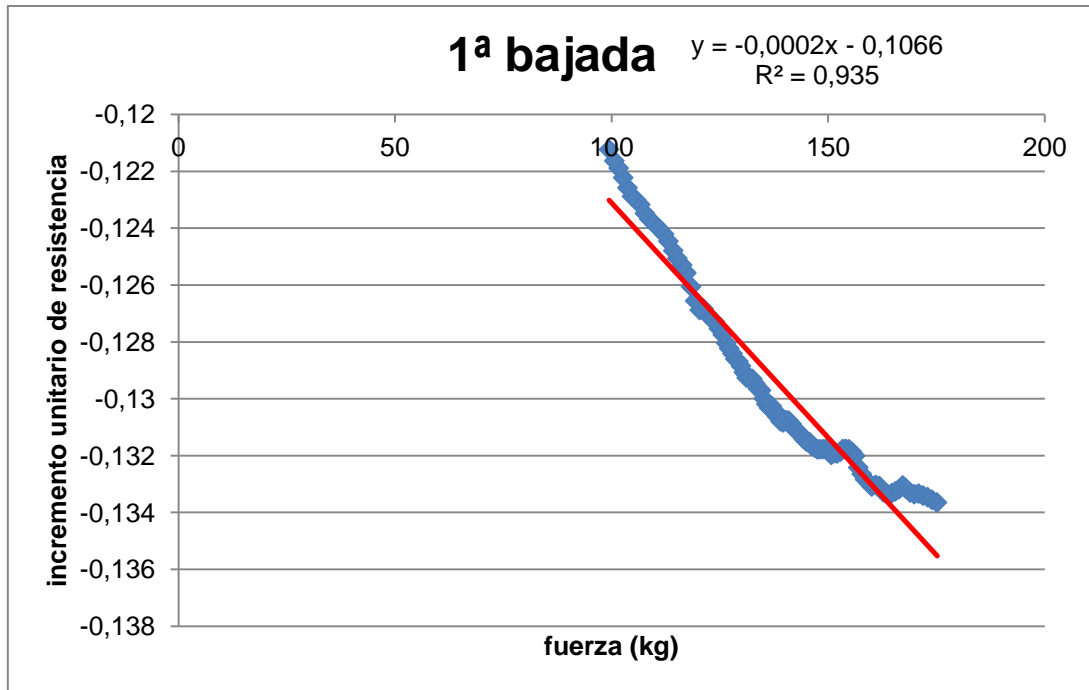


**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

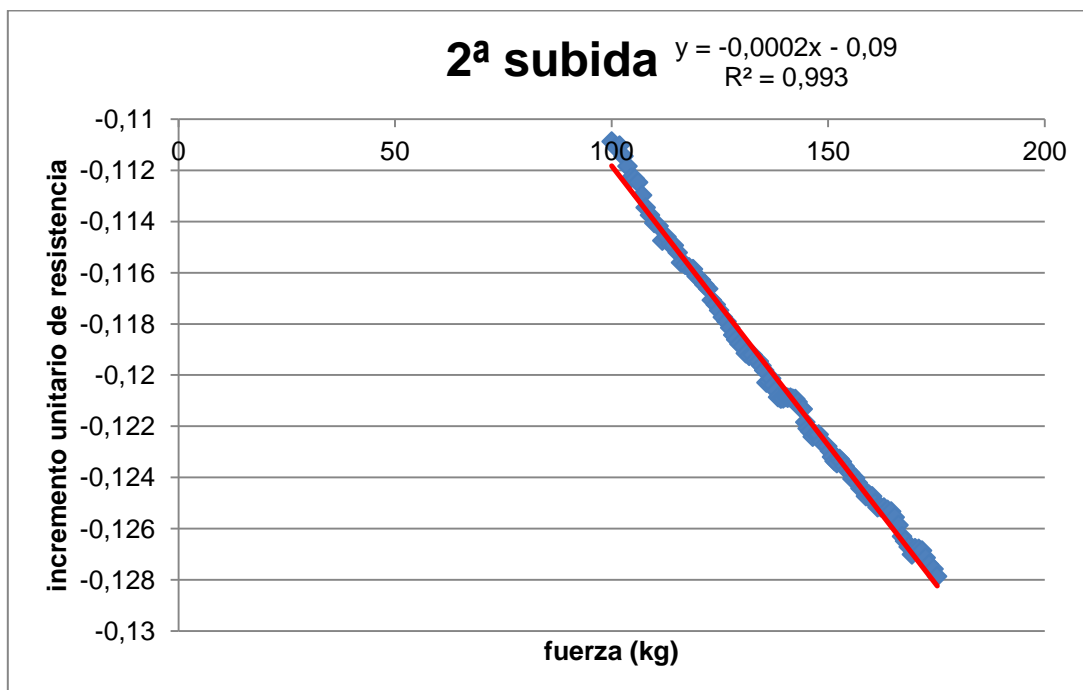
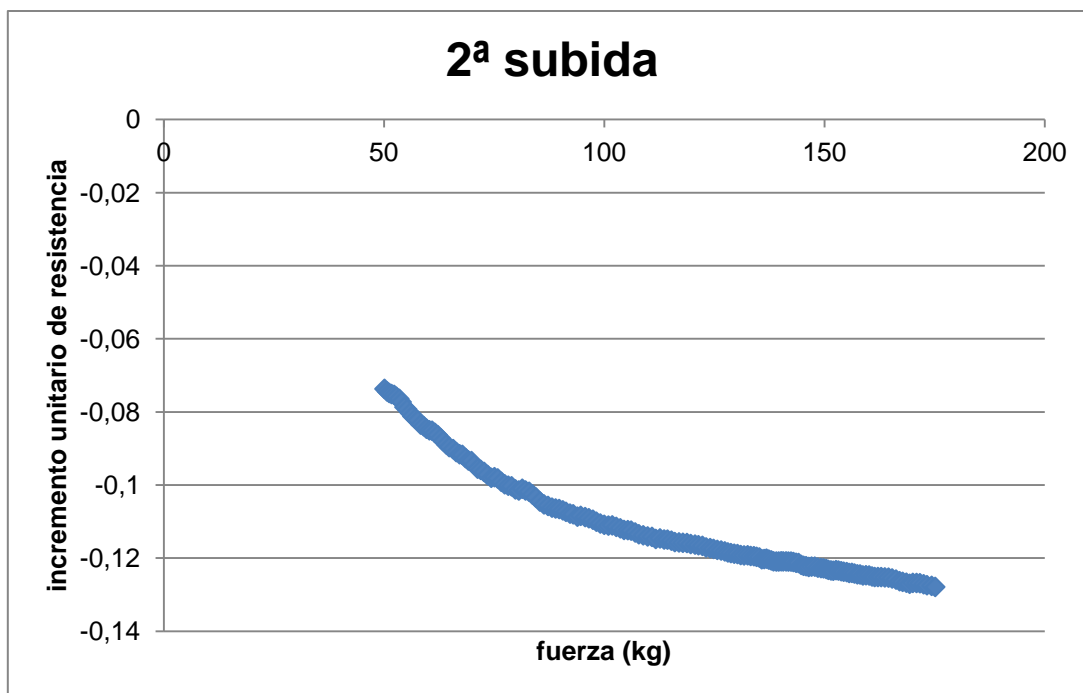




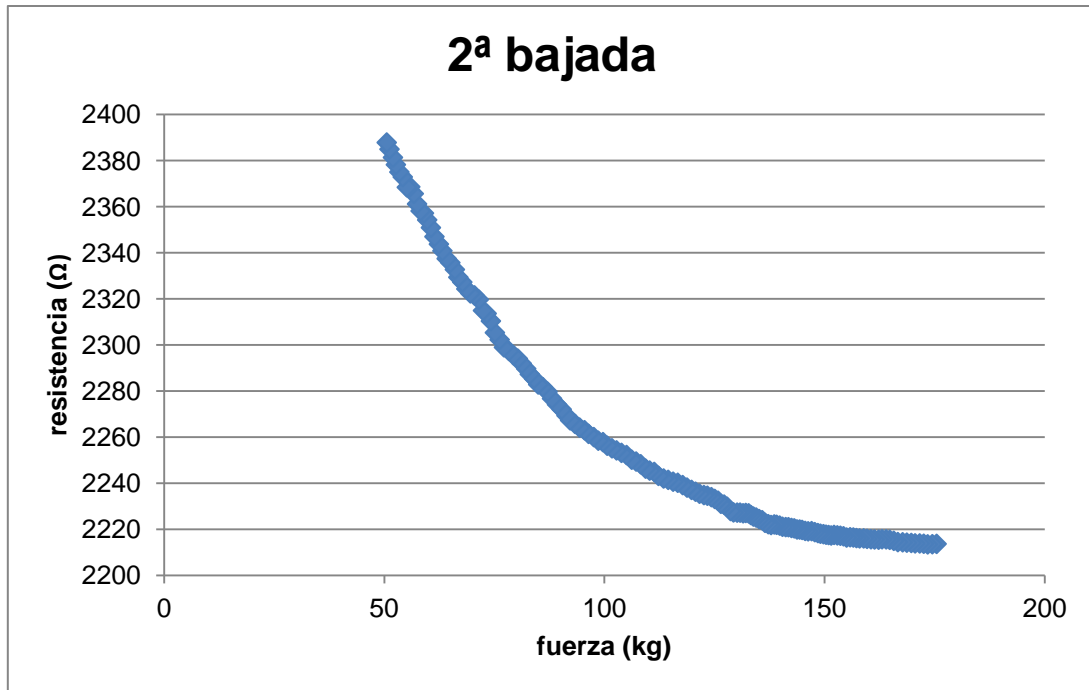
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



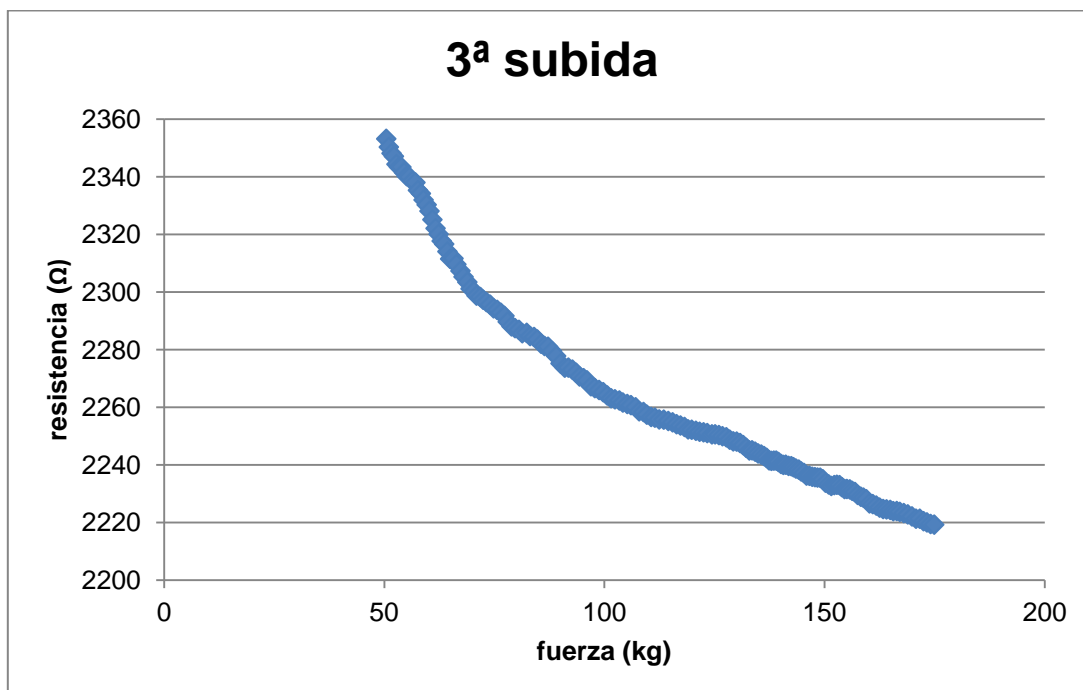
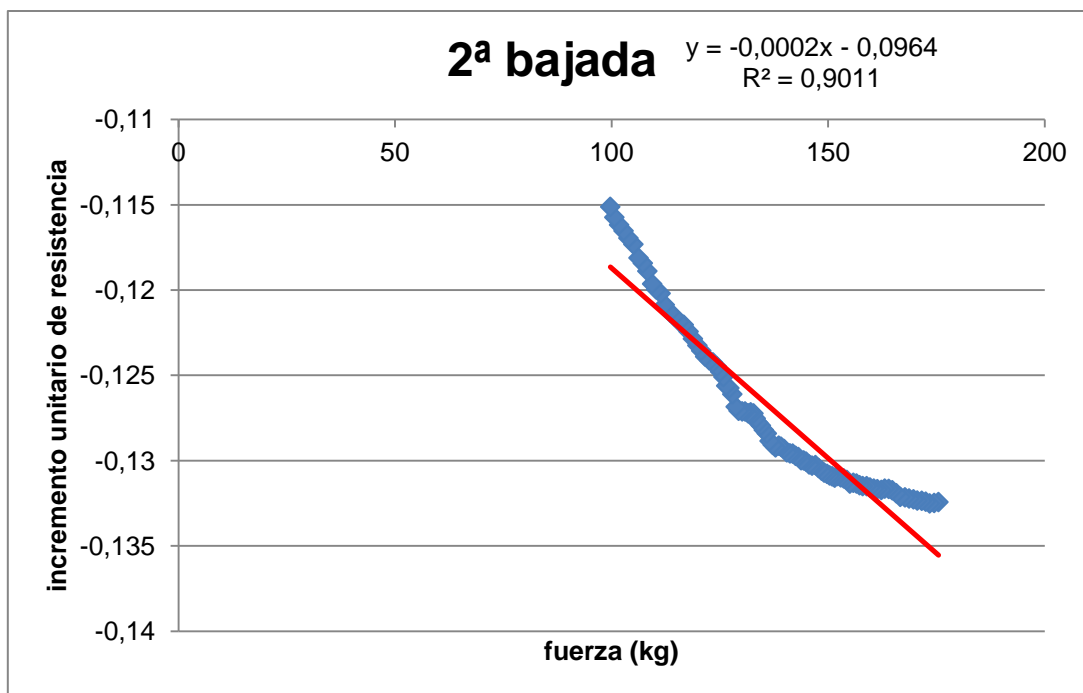
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



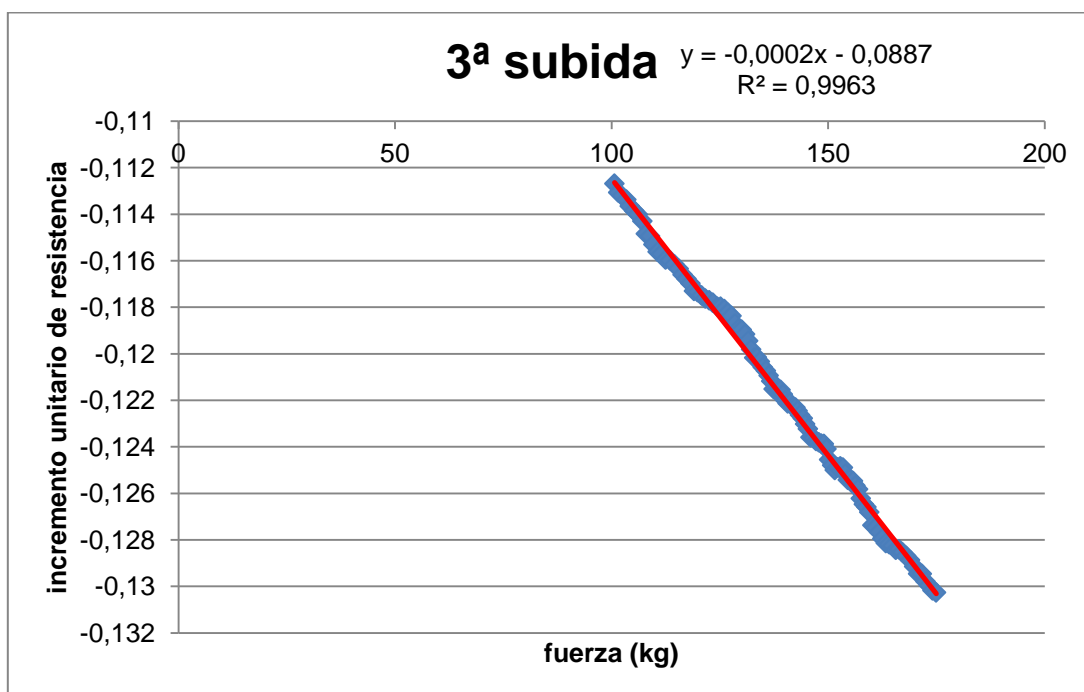
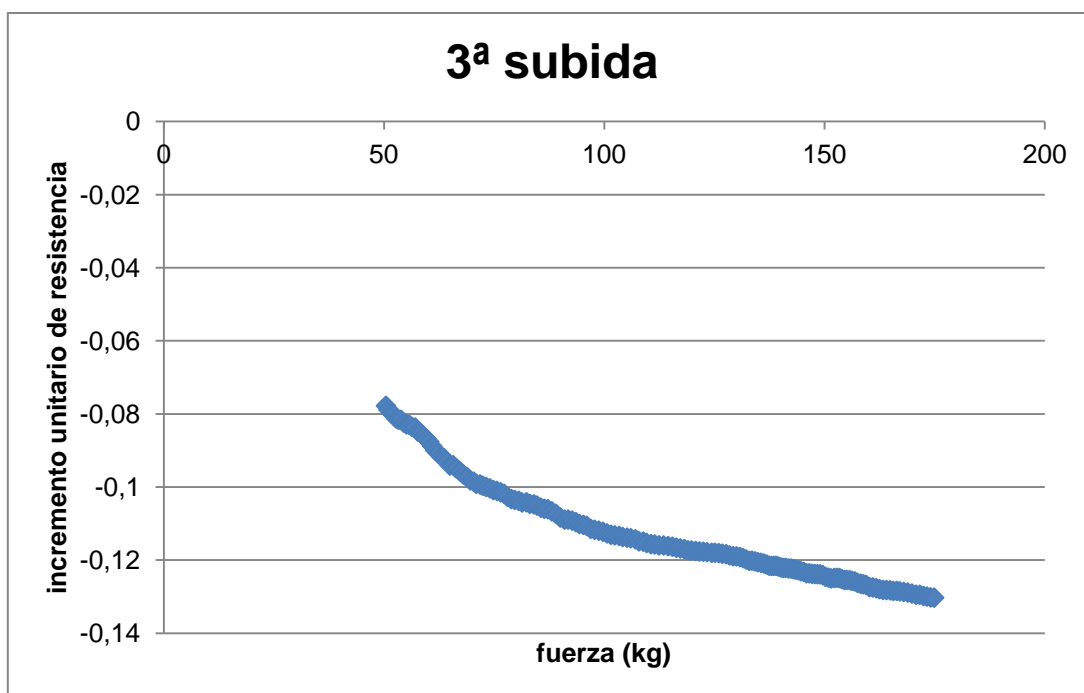
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



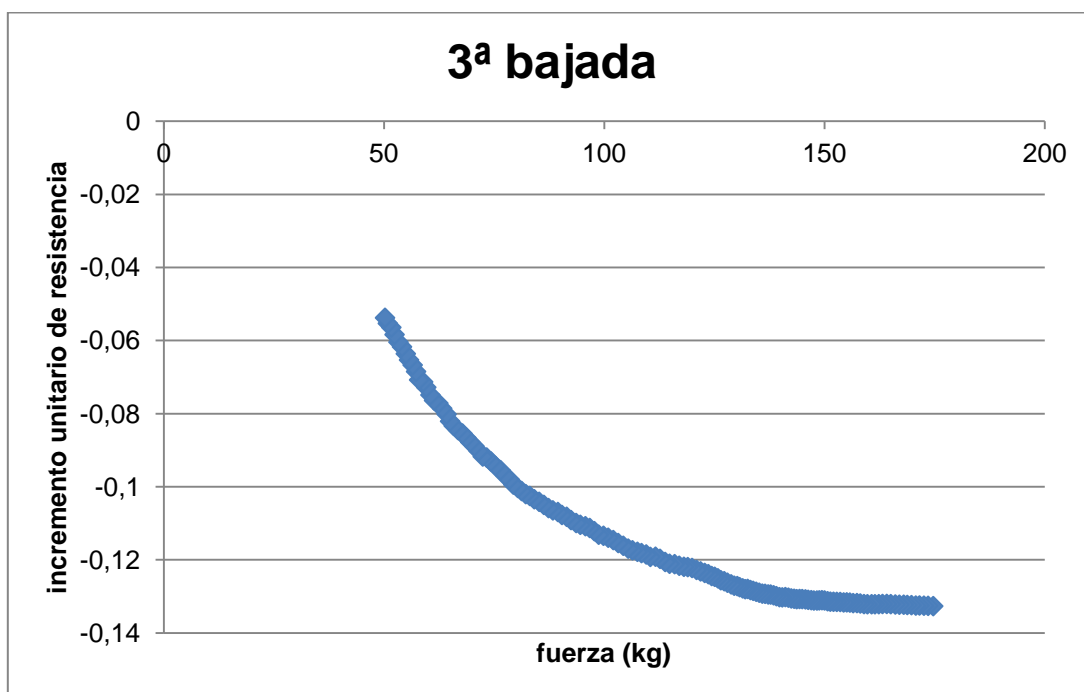
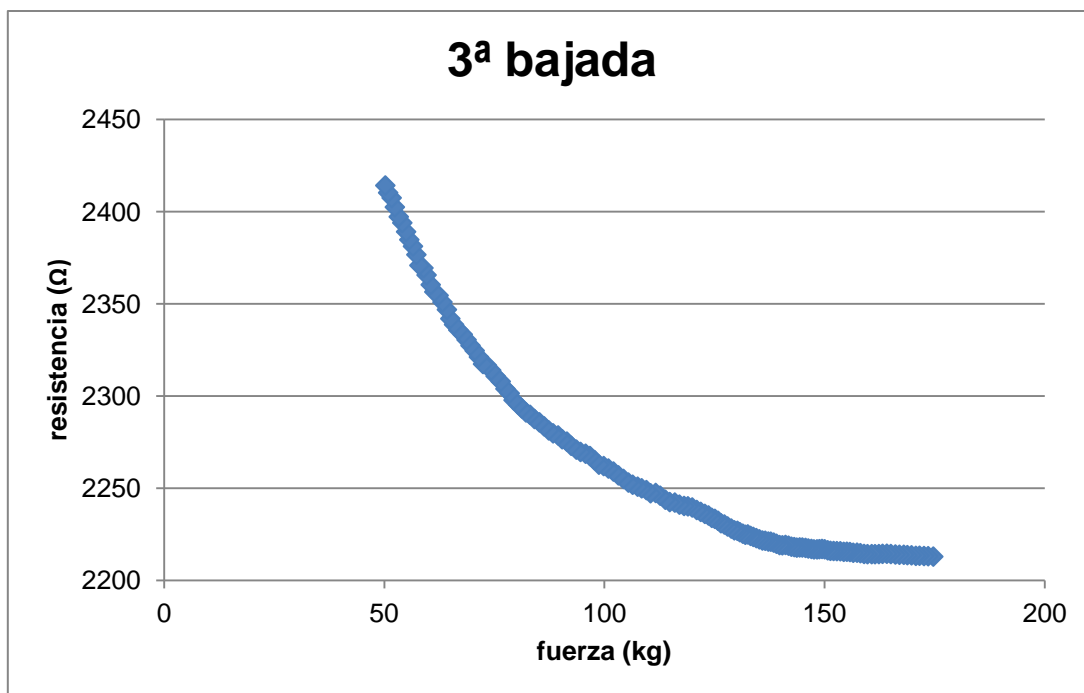
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



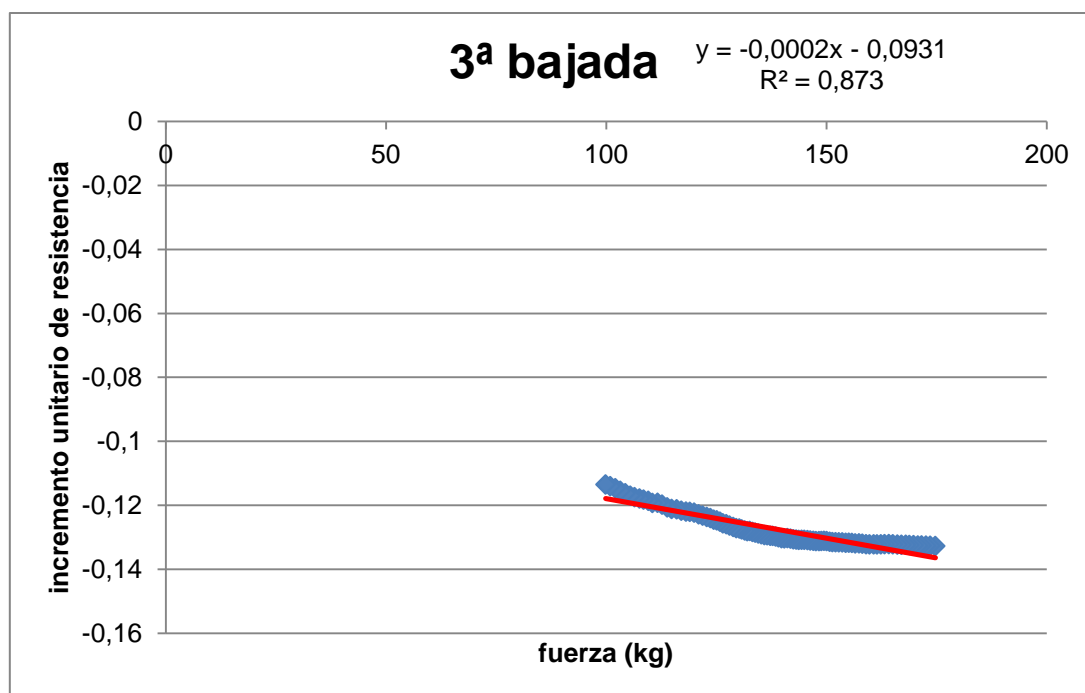
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



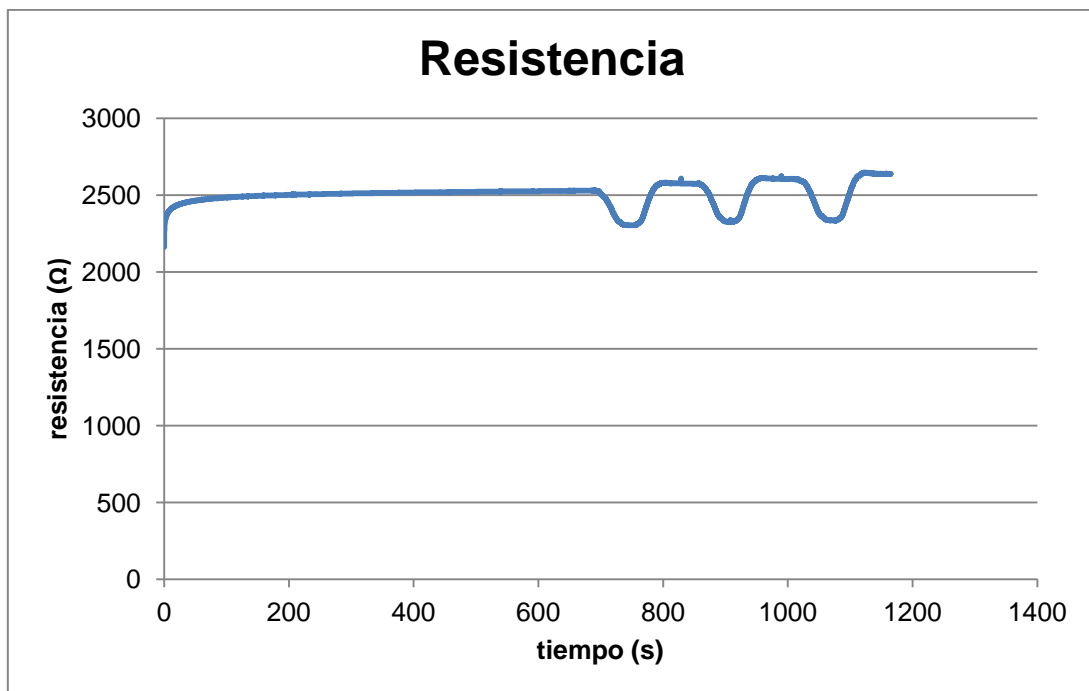
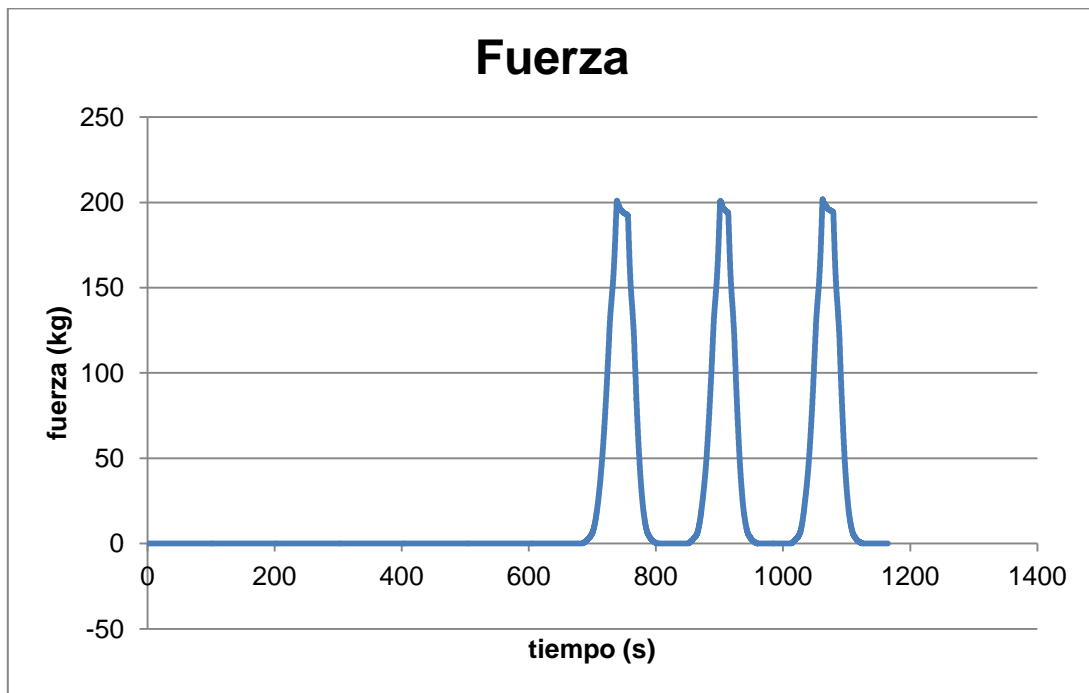
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

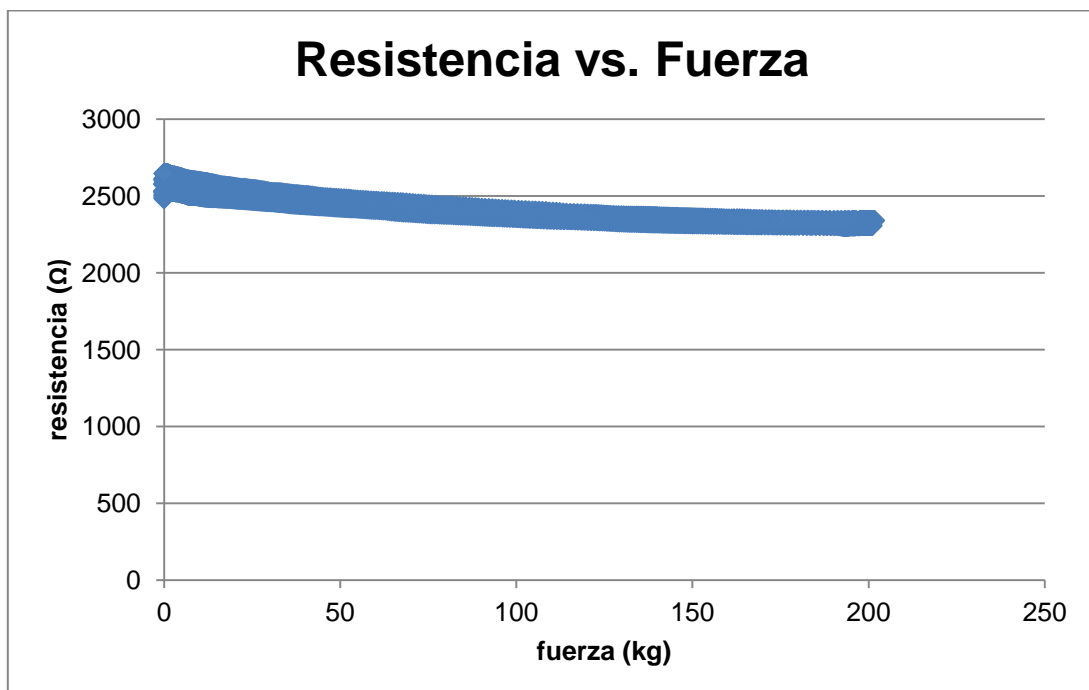
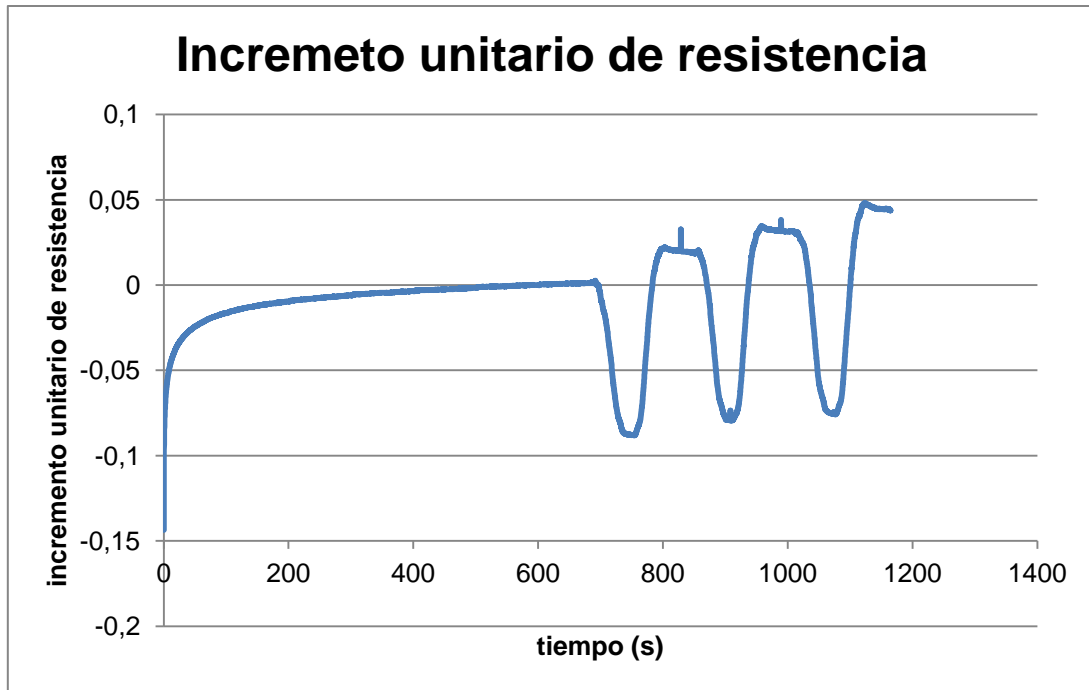


#### 4 Sensor 35

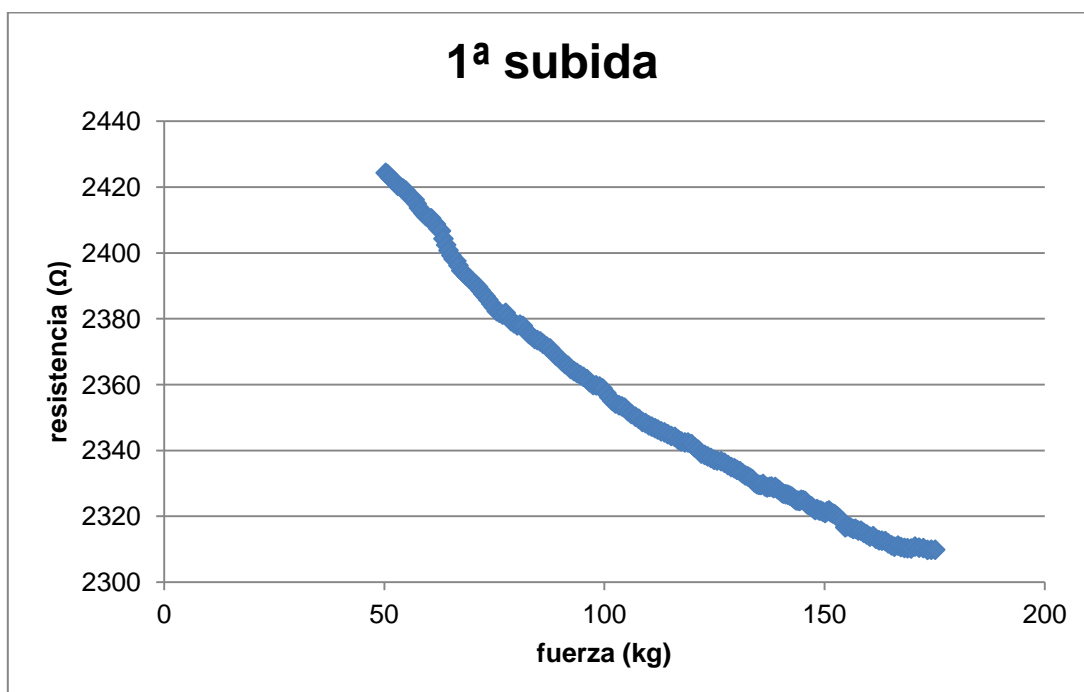
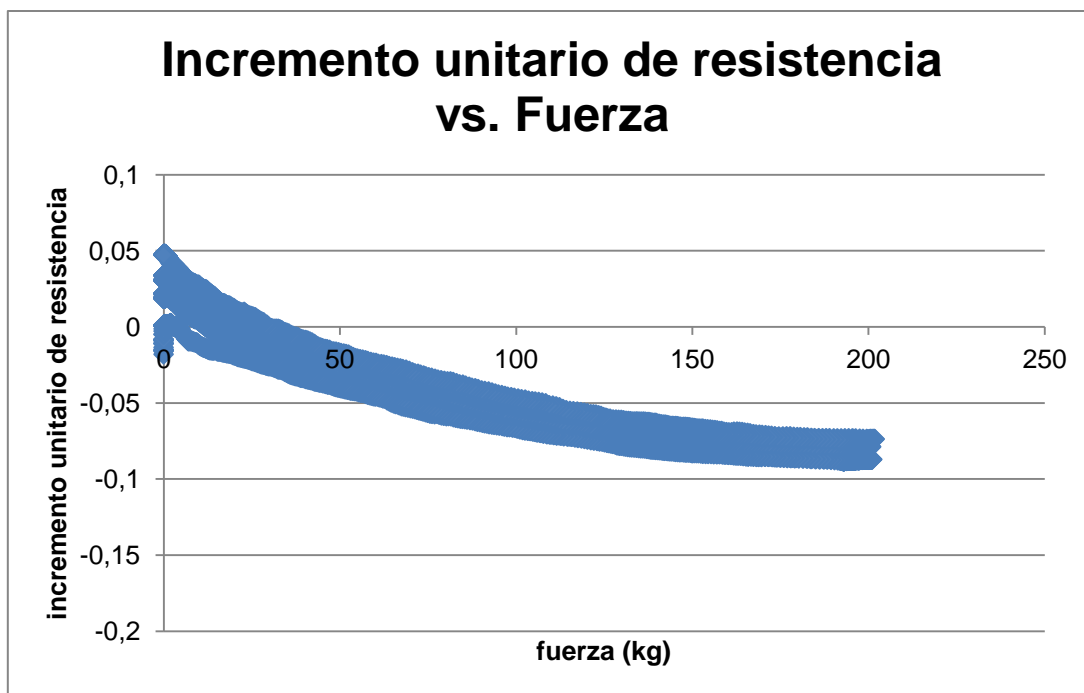




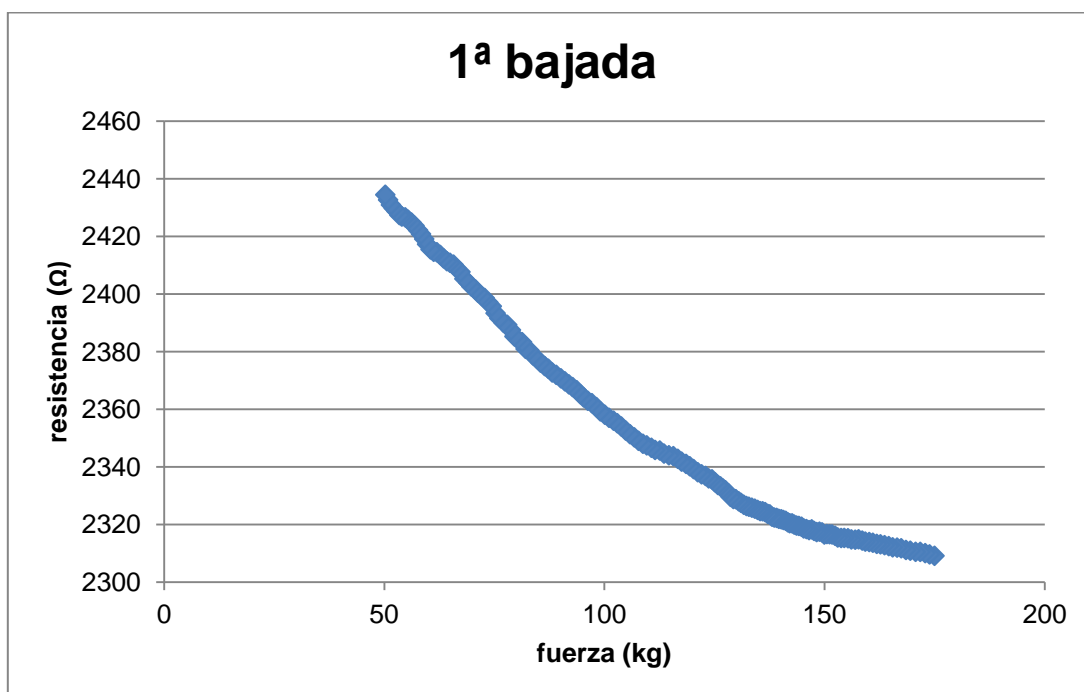
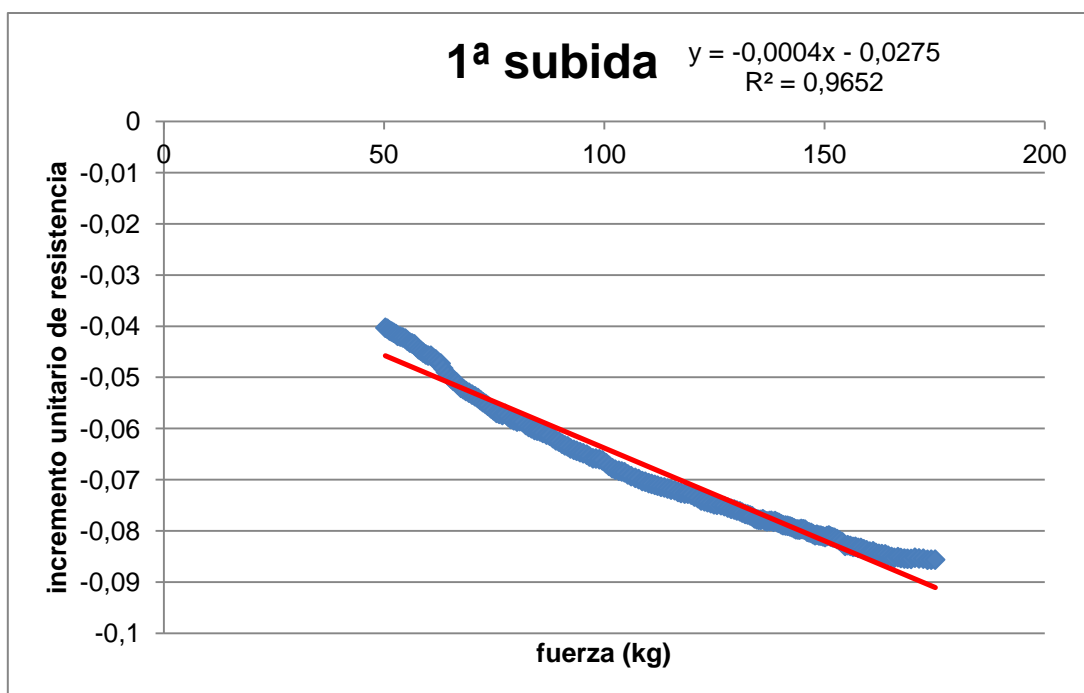
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



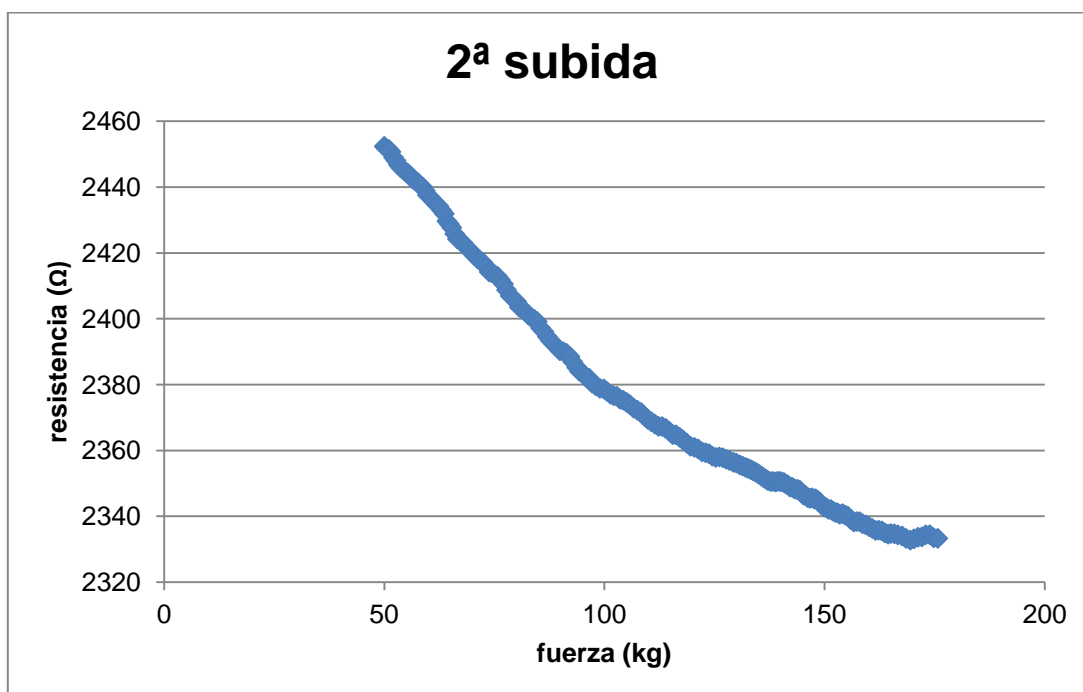
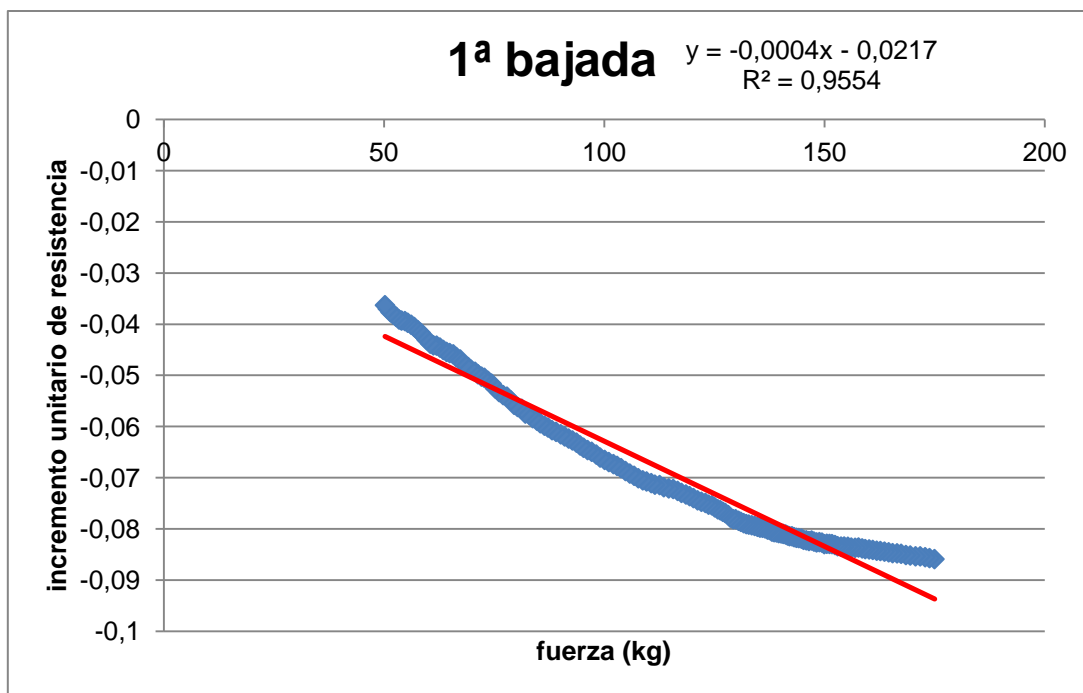
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



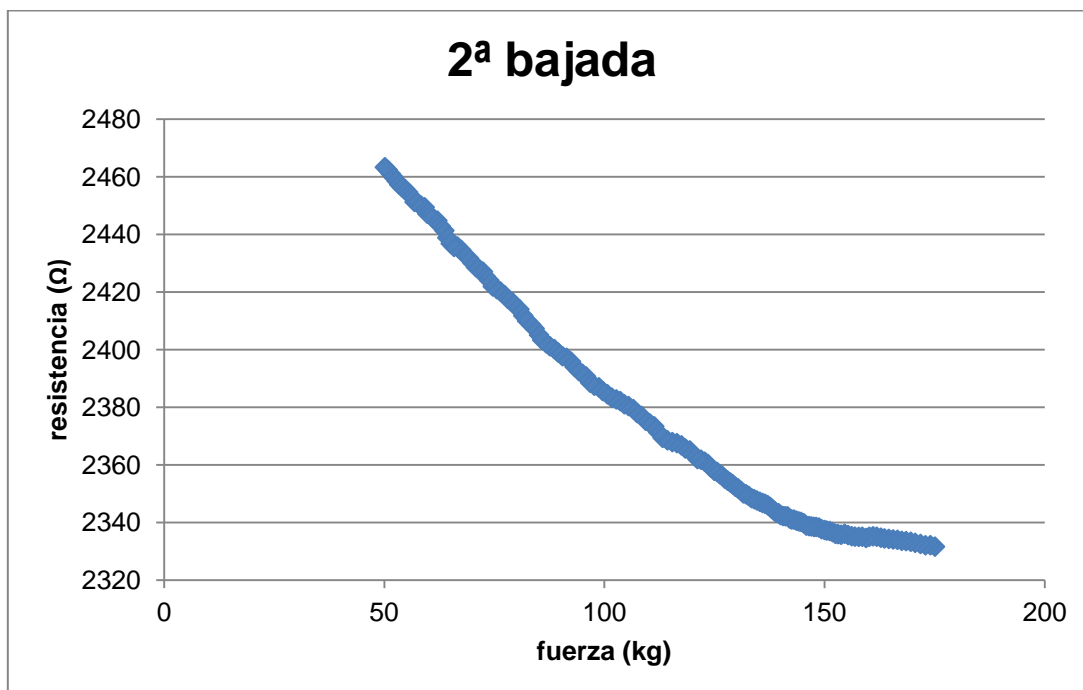
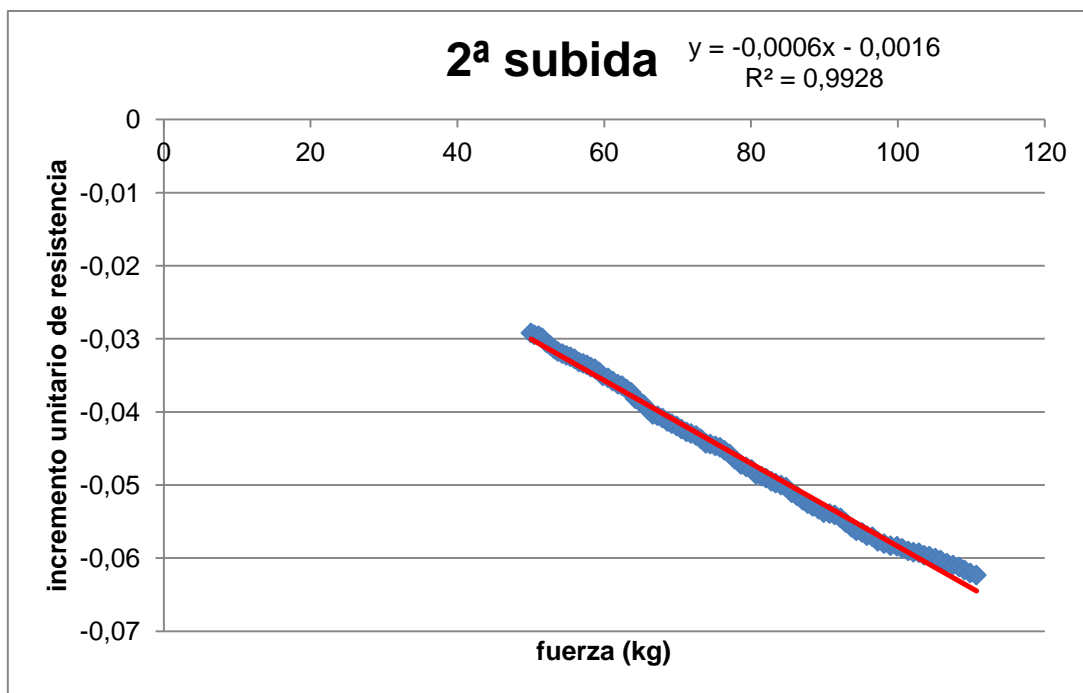
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



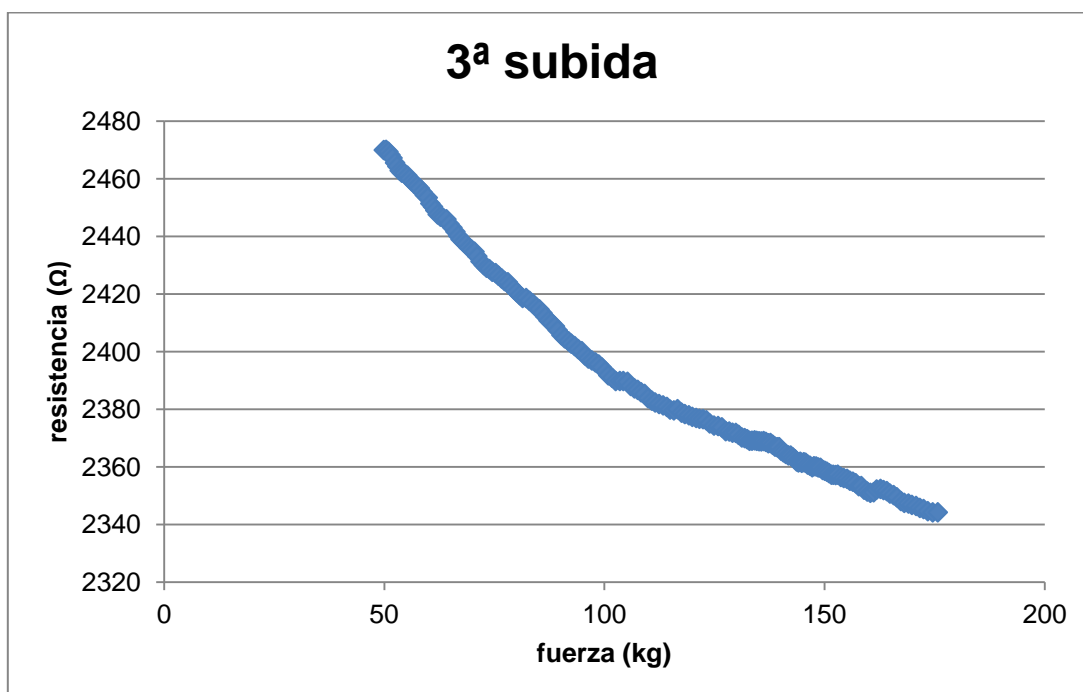
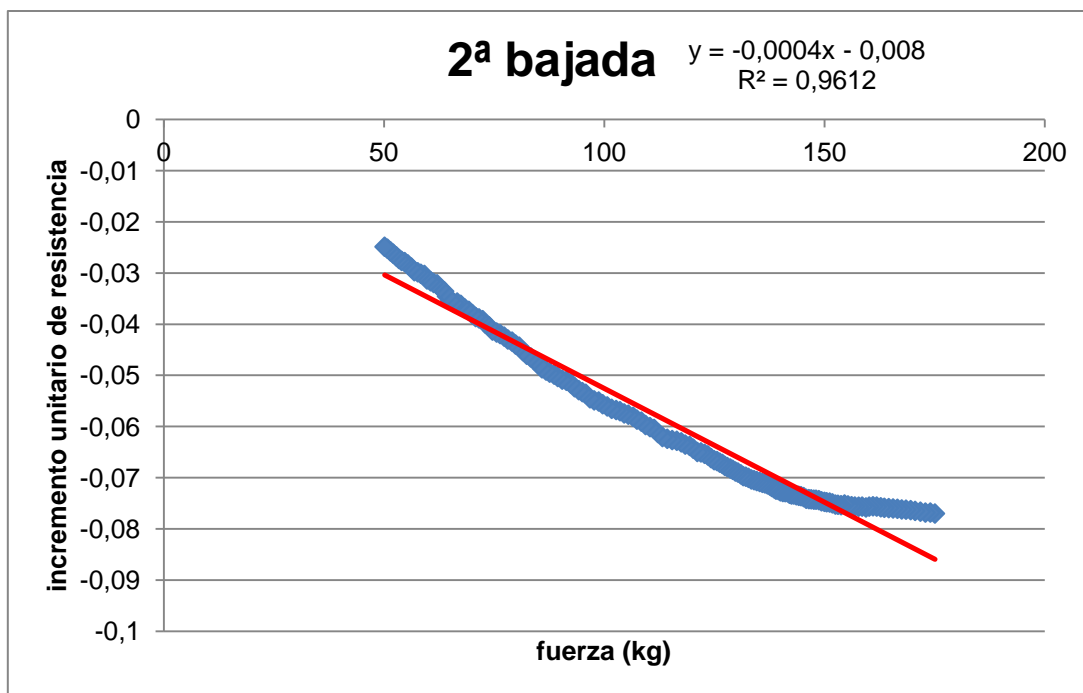
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



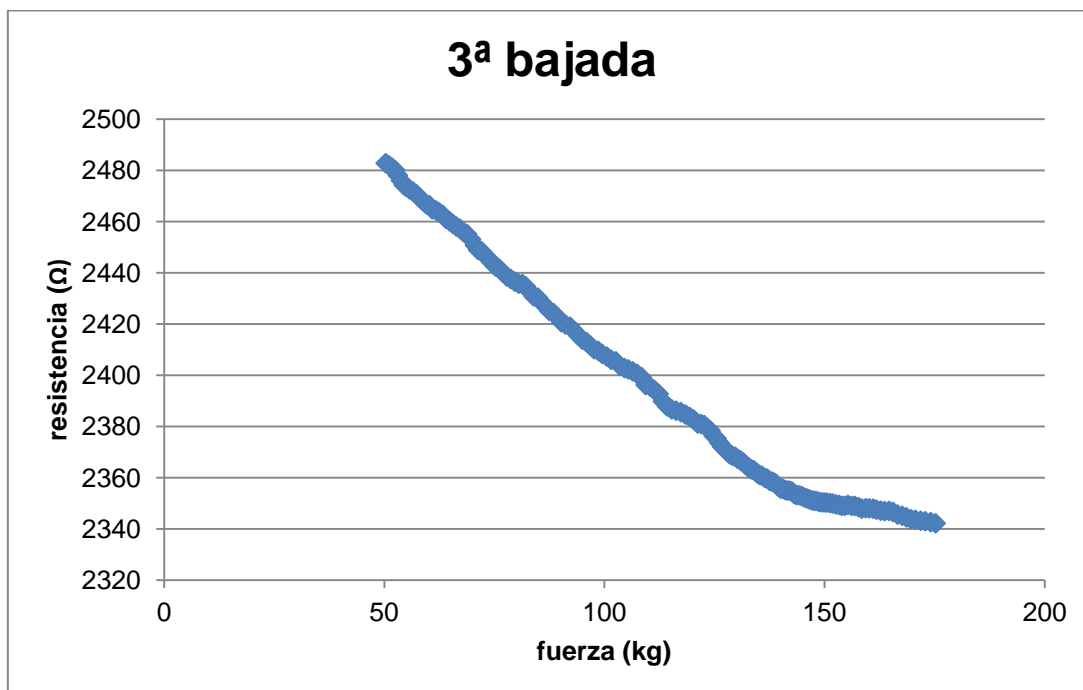
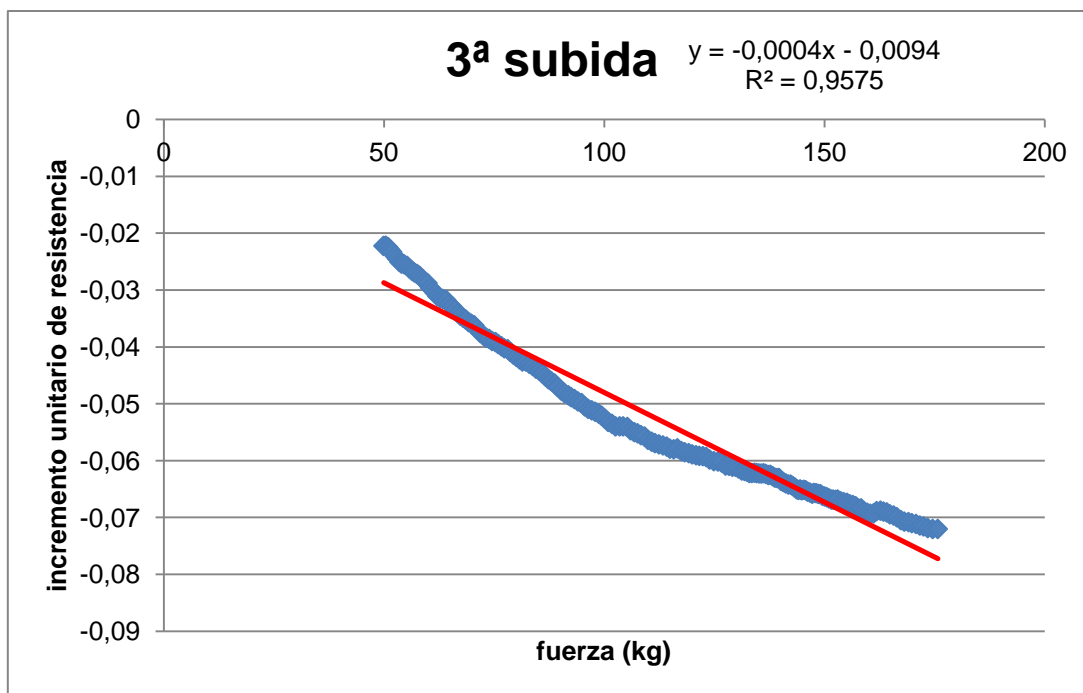
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



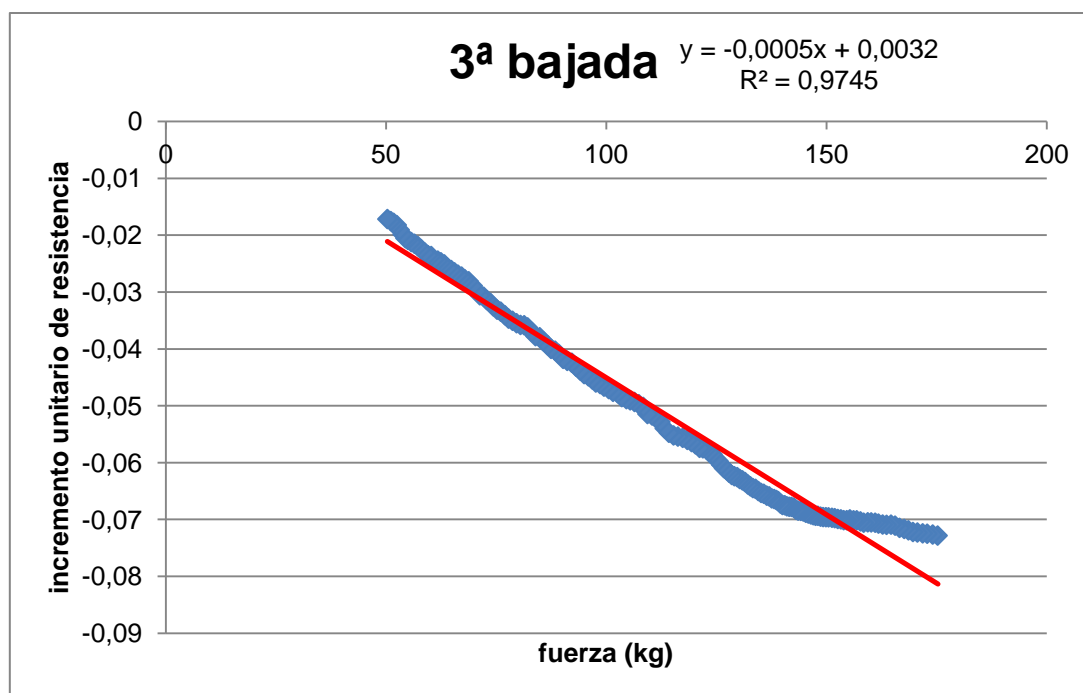
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

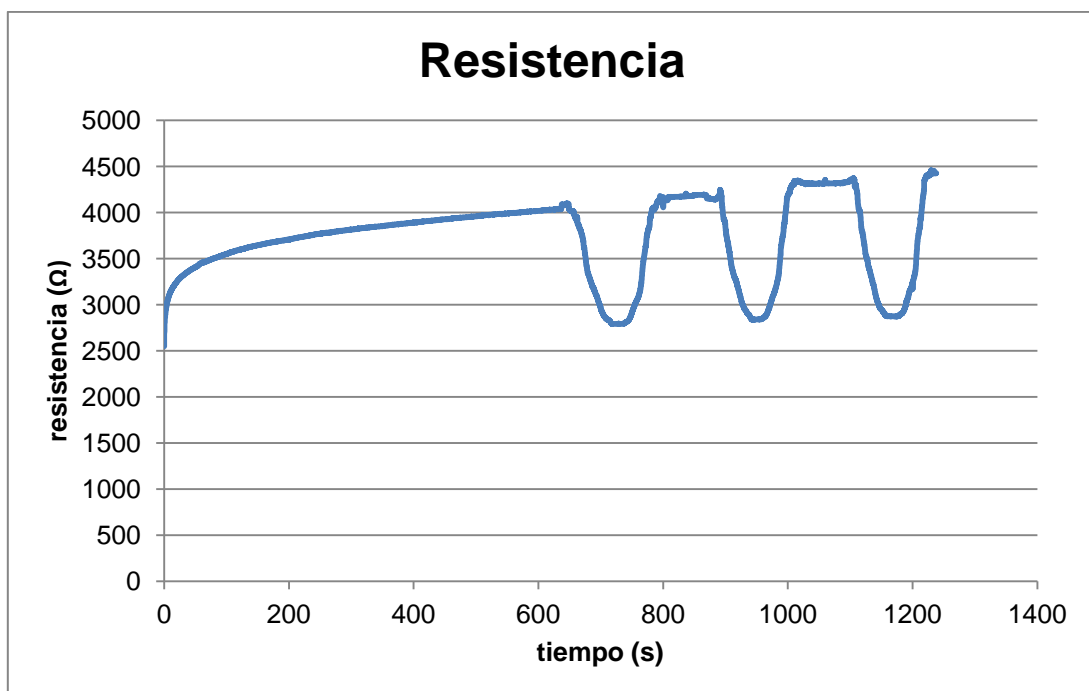
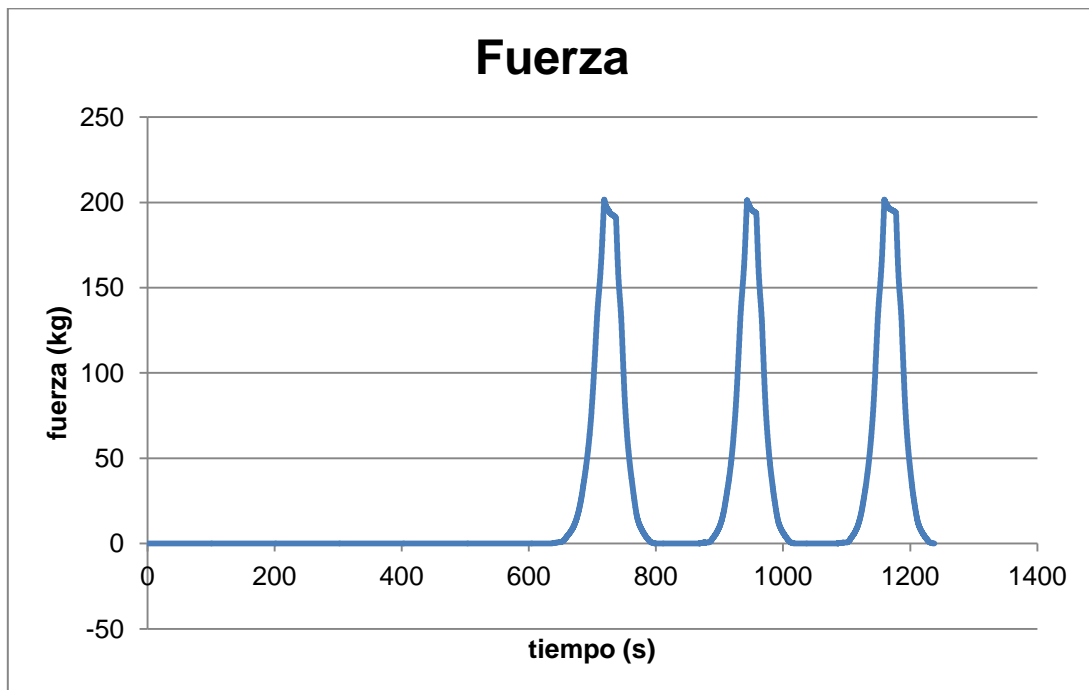


**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

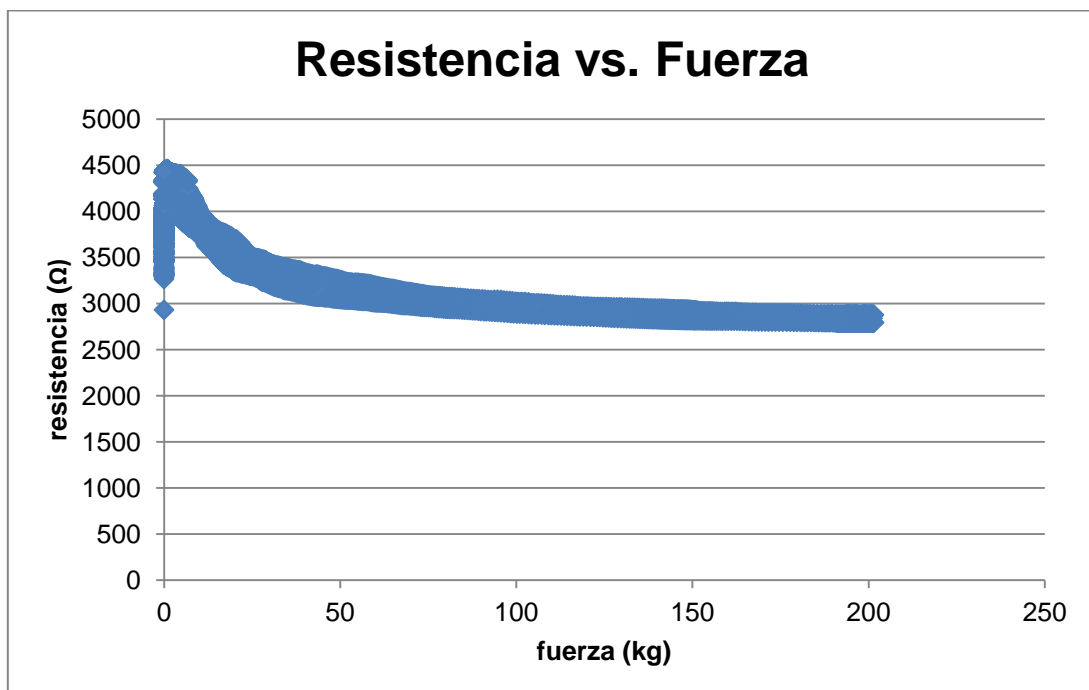
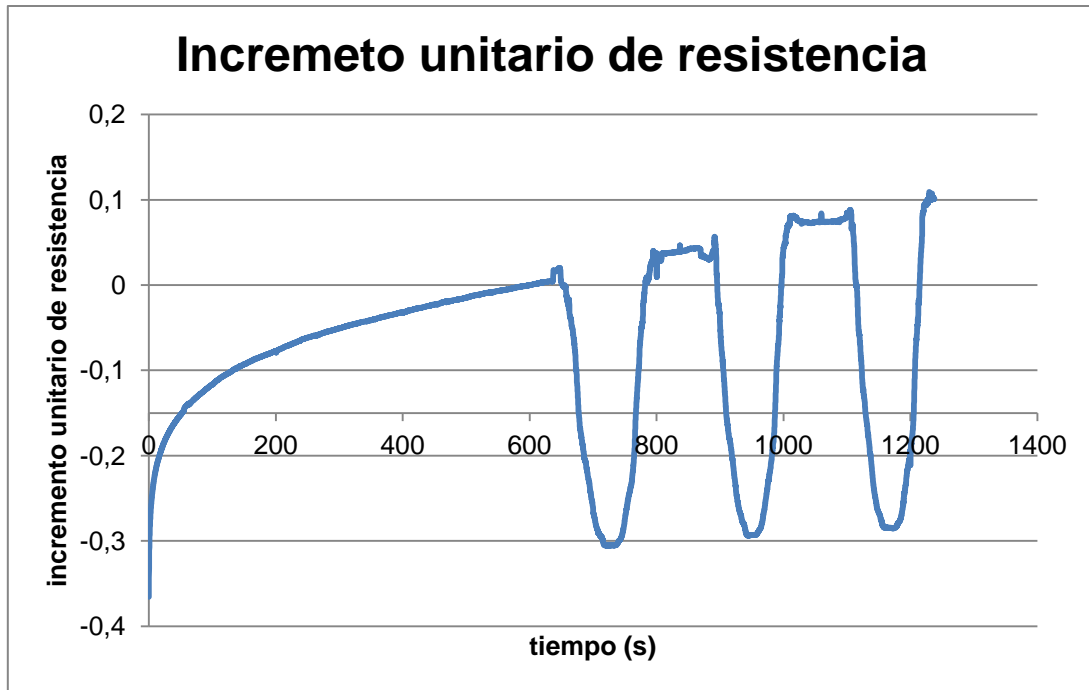




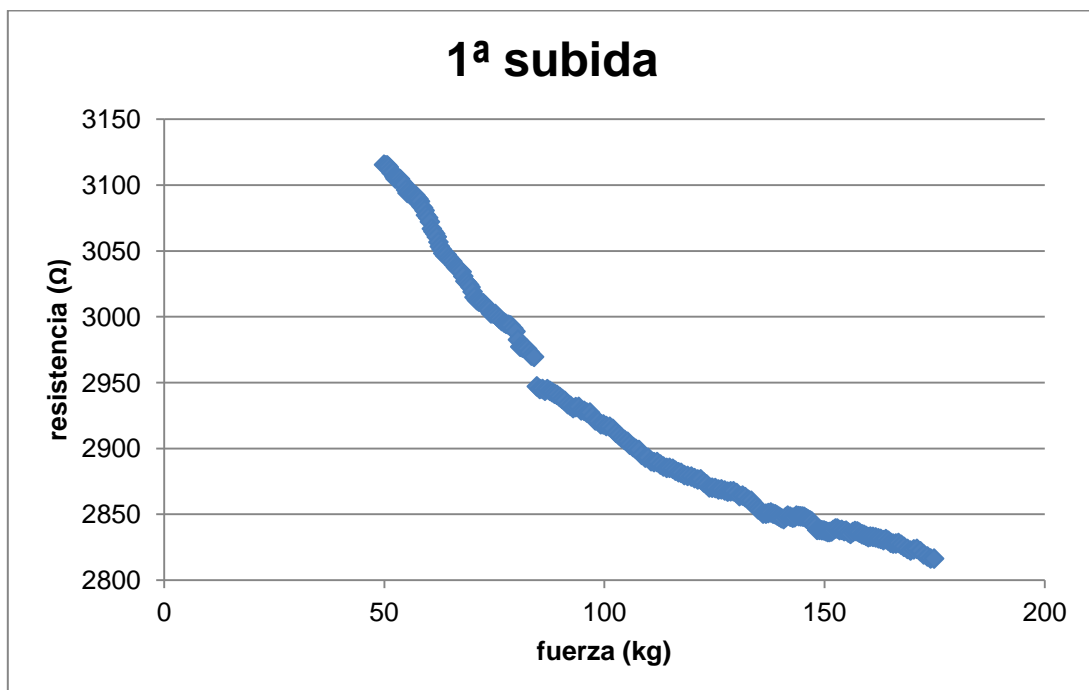
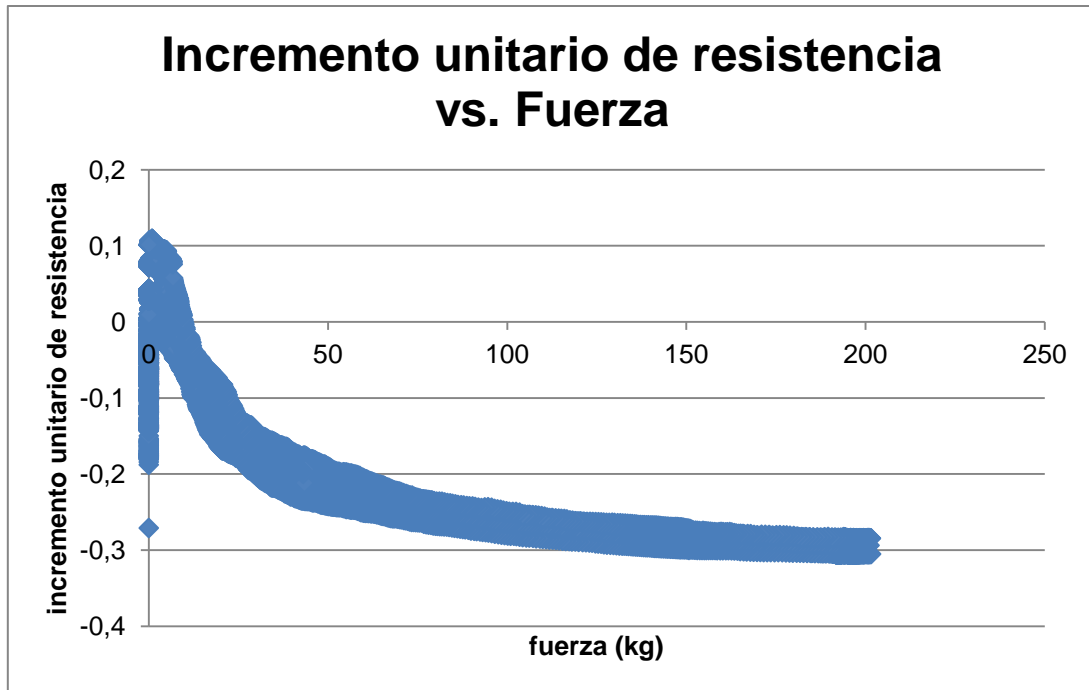
## 5 Sensor 38



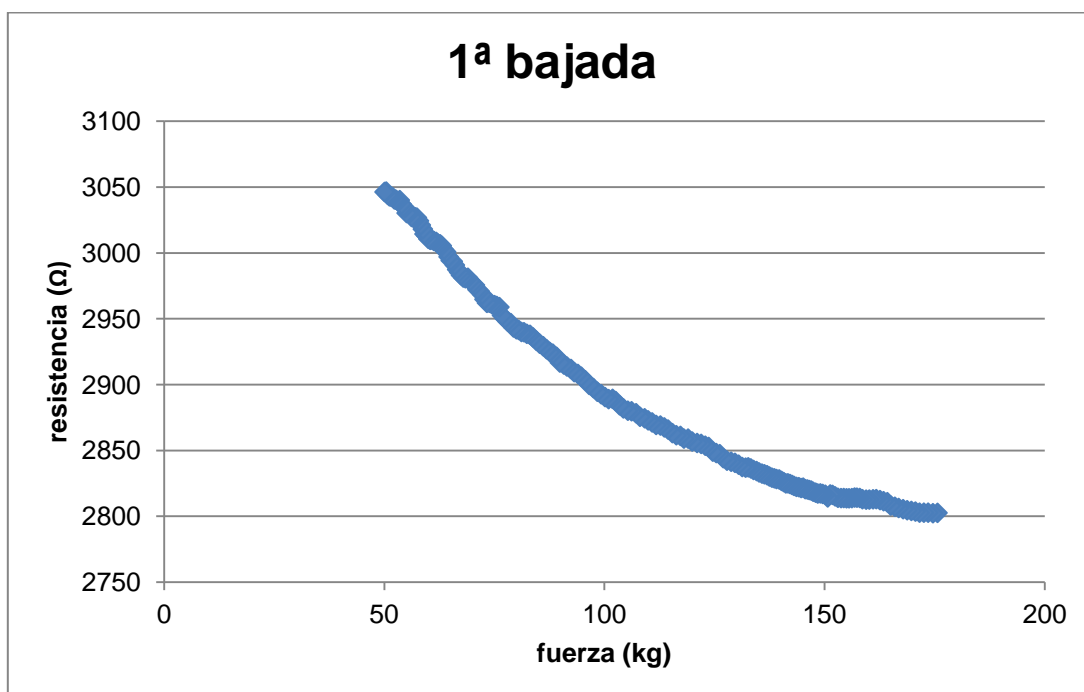
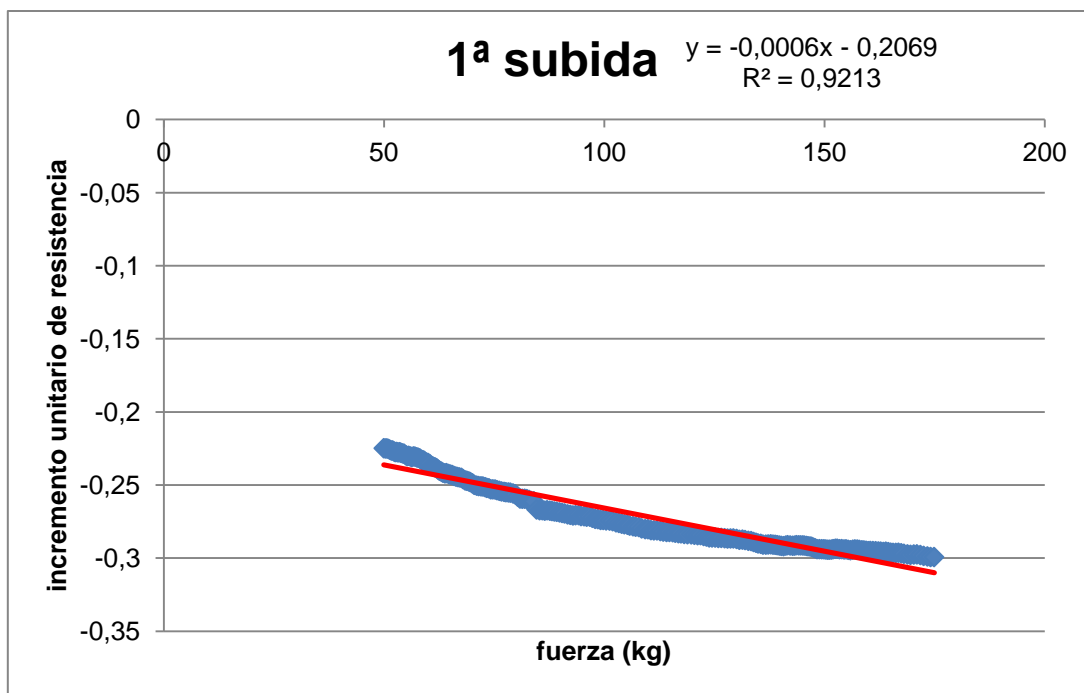
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



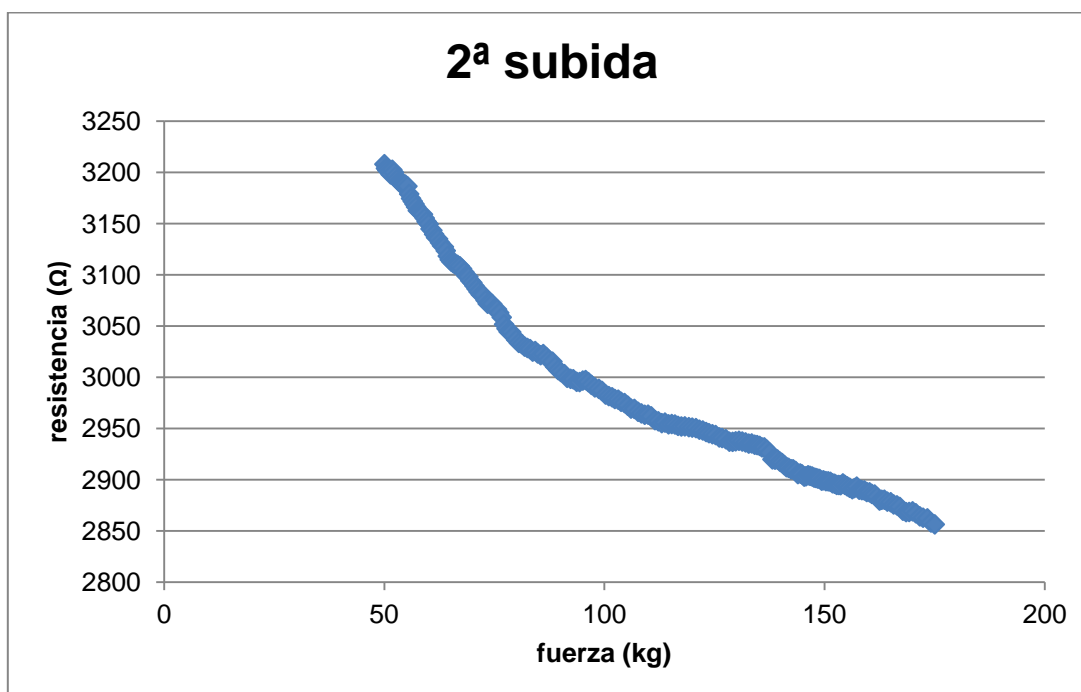
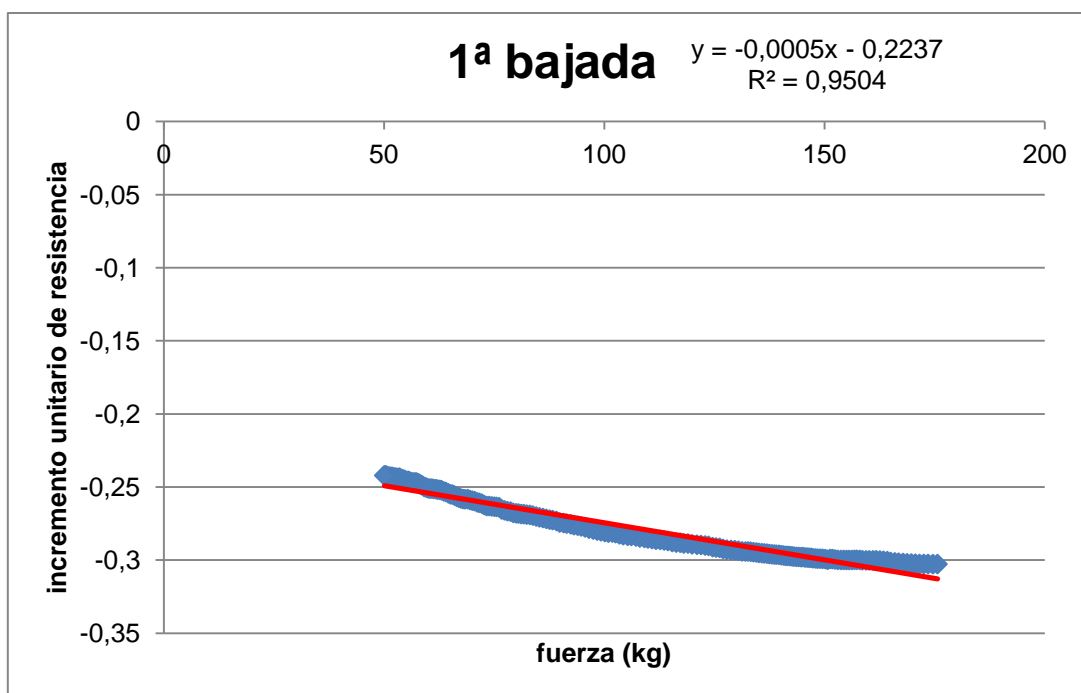
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



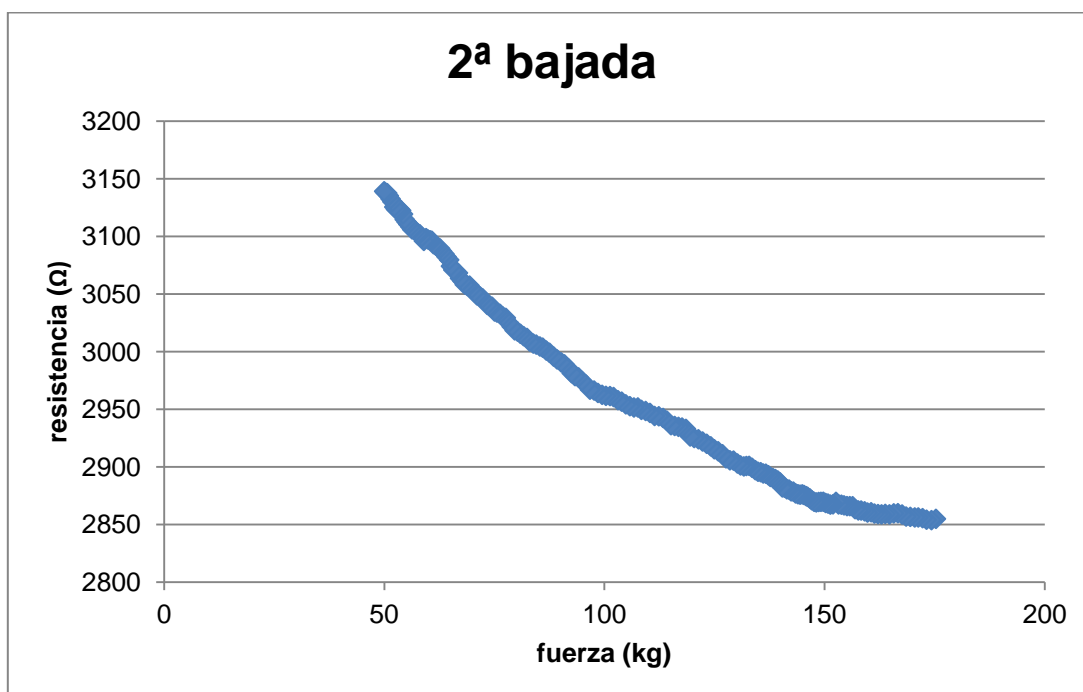
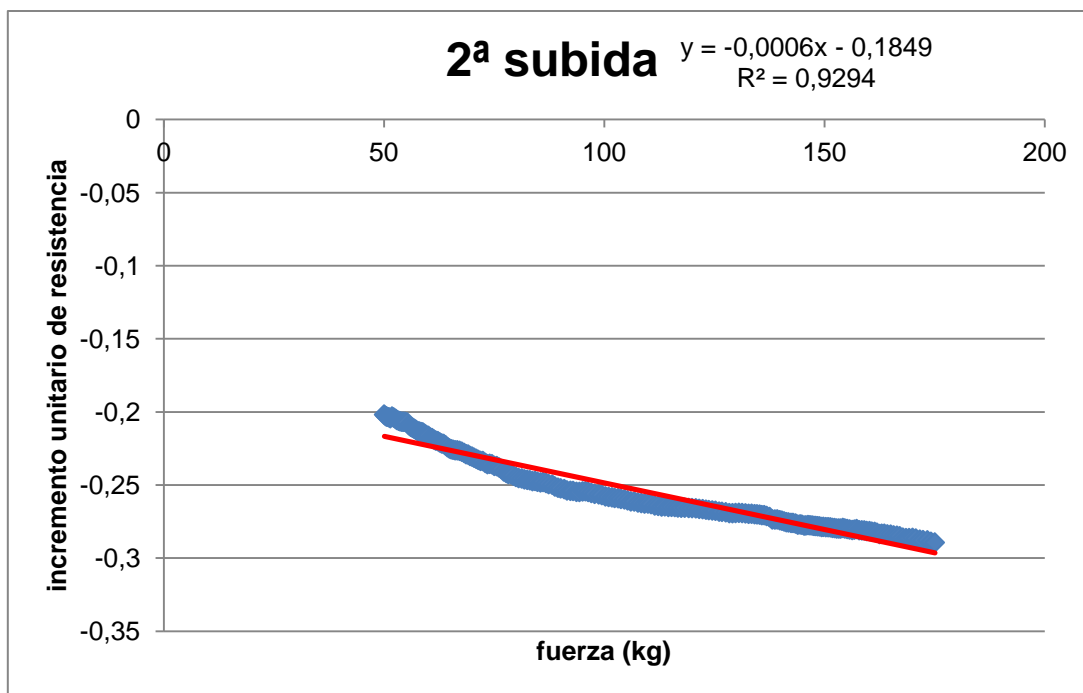
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



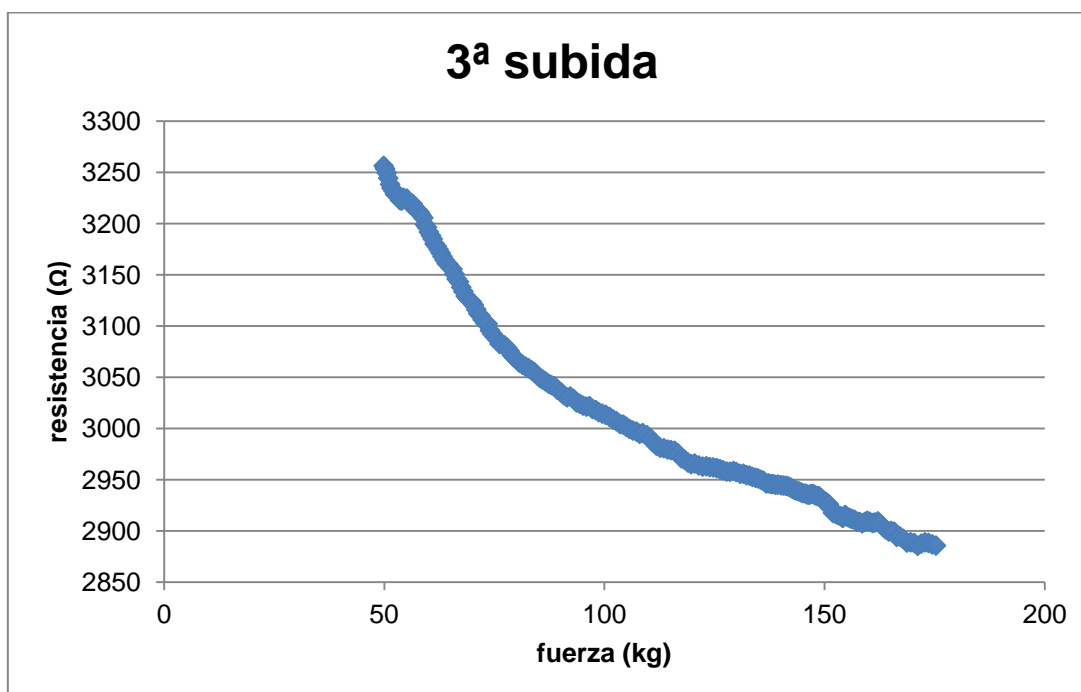
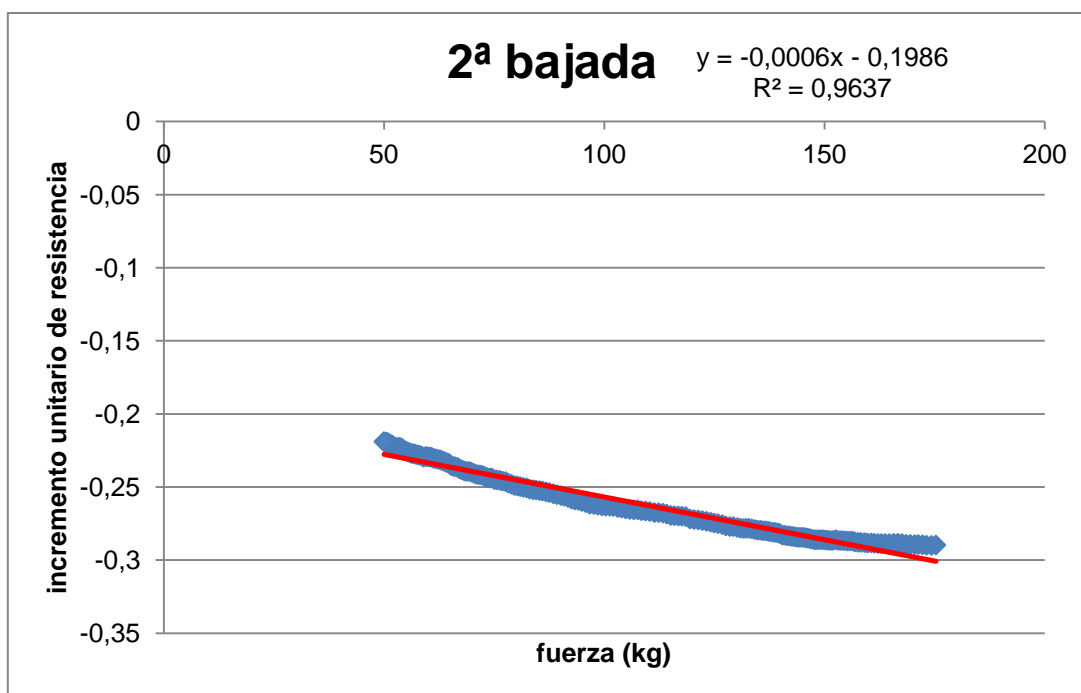
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



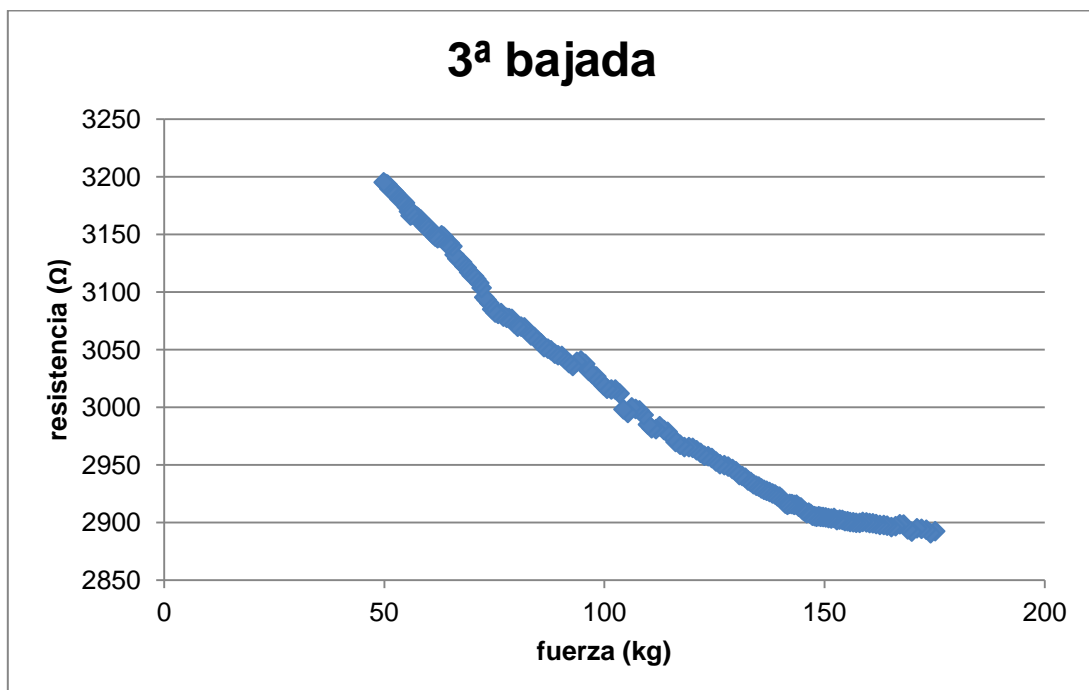
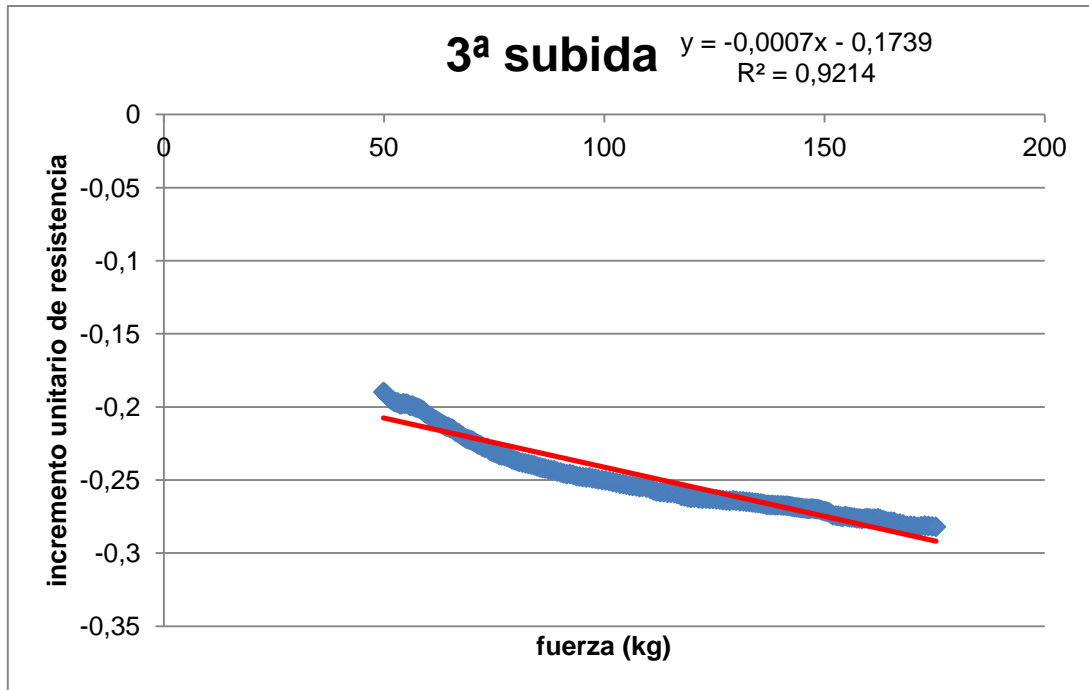
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

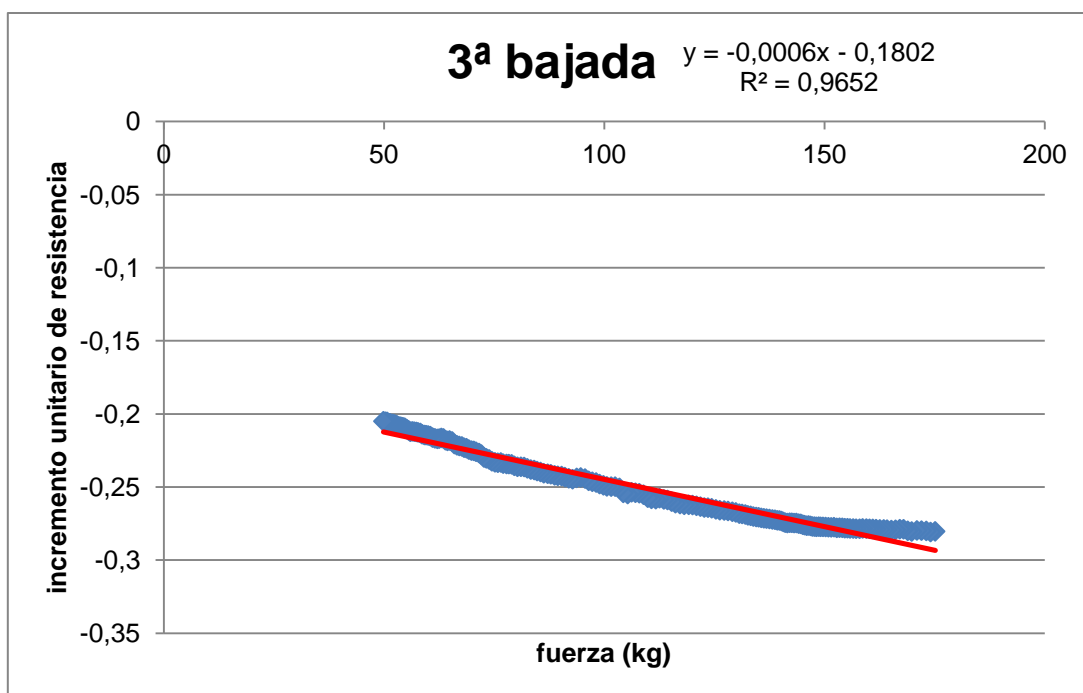


**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

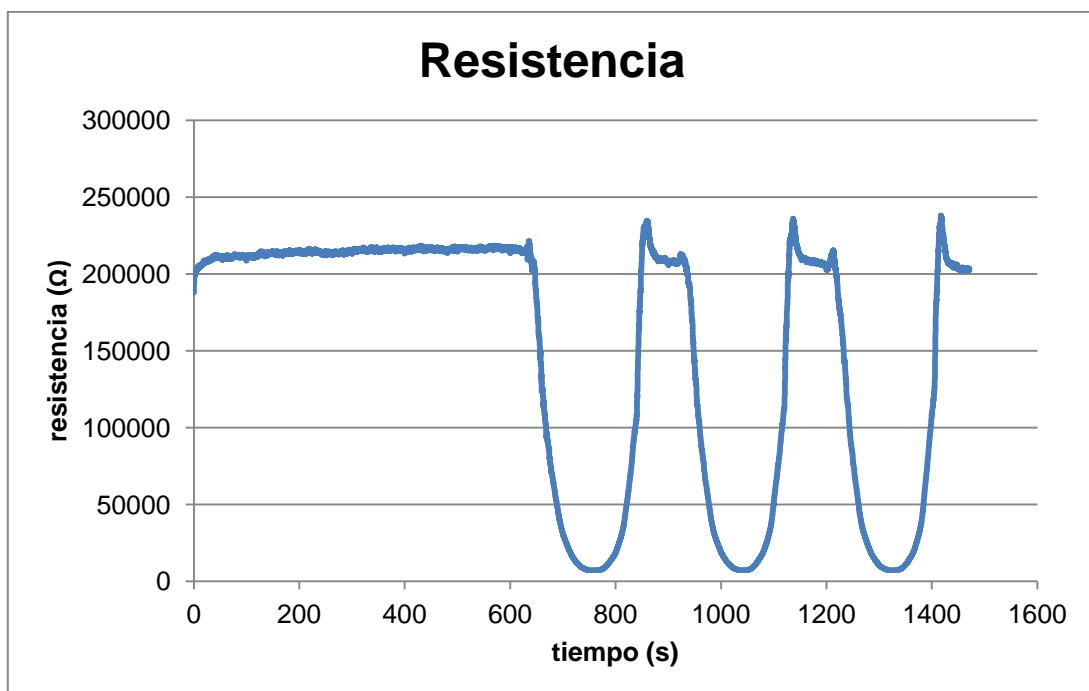
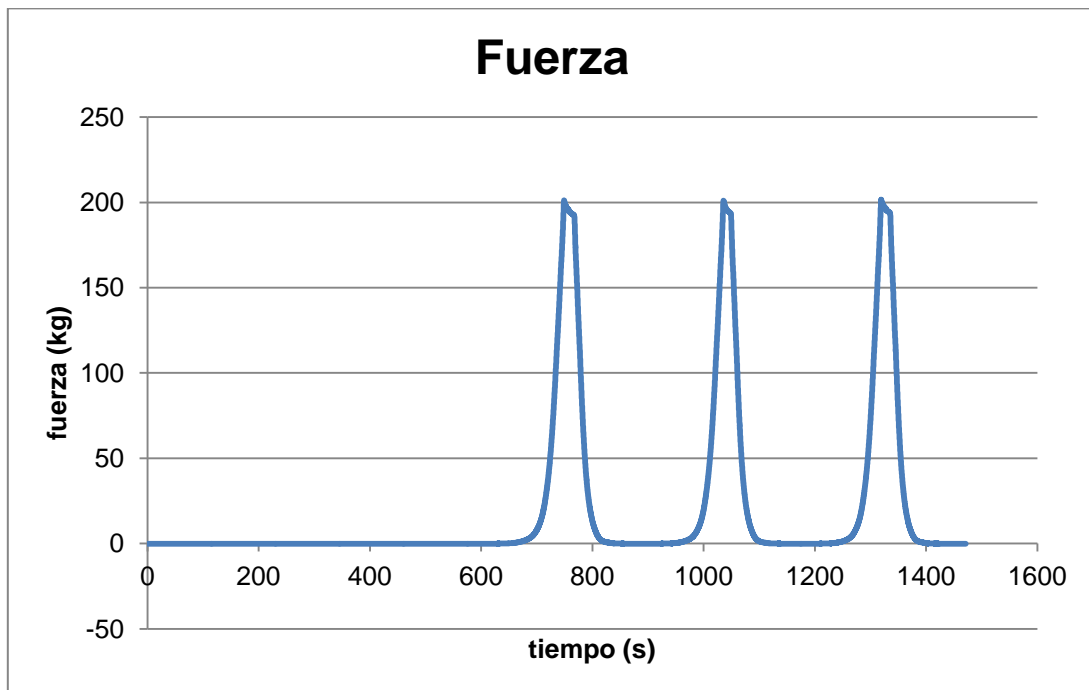




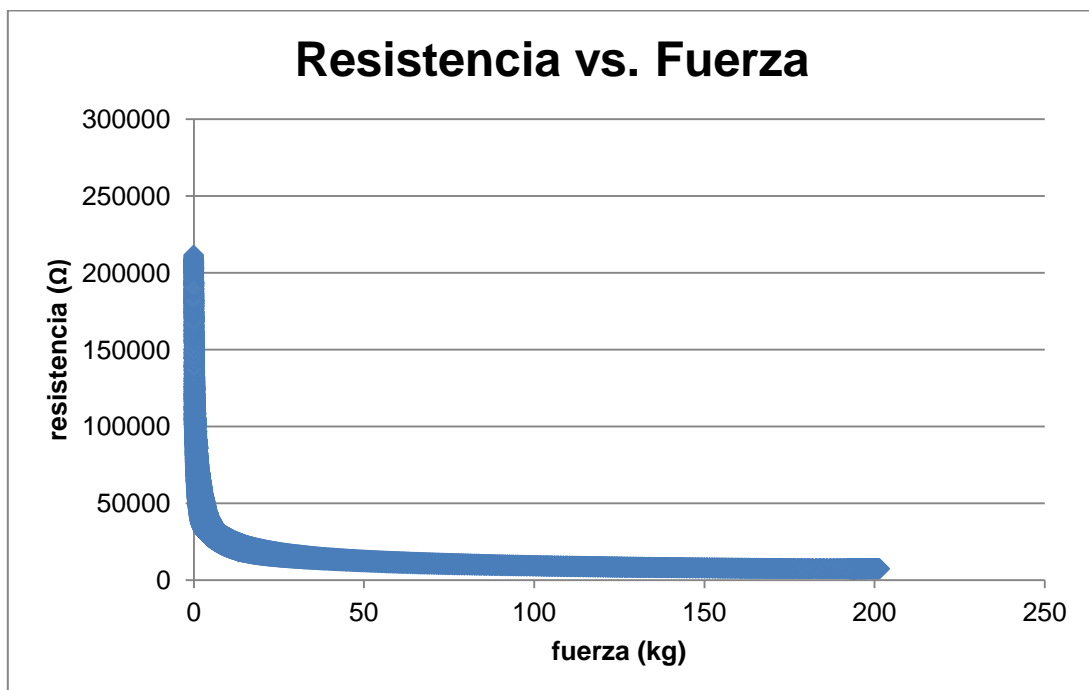
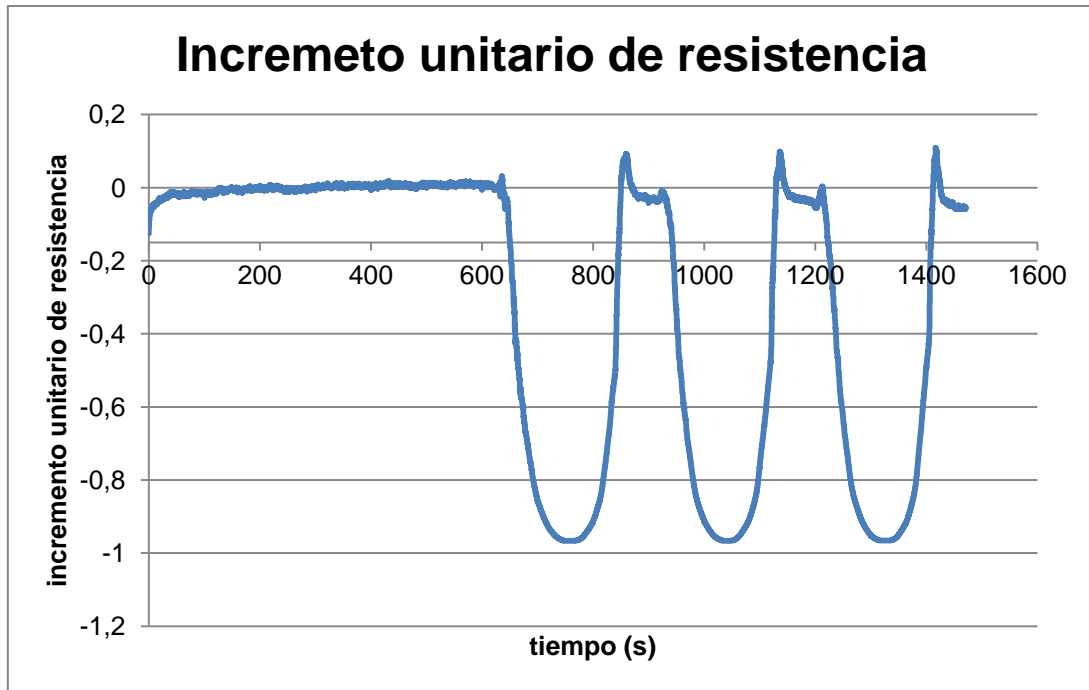
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



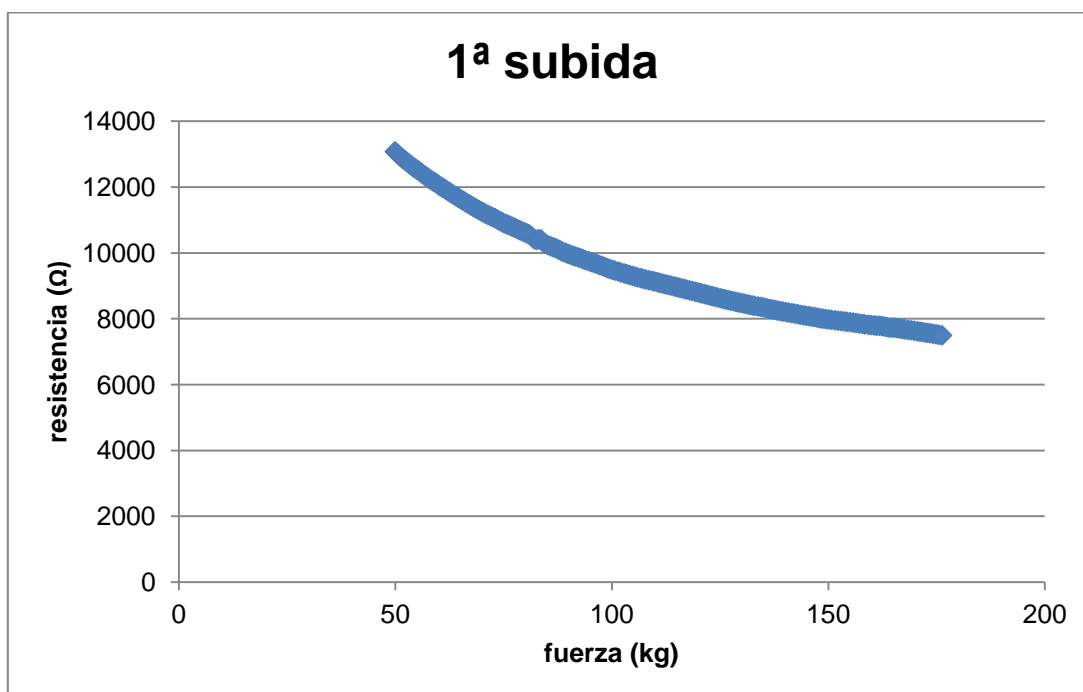
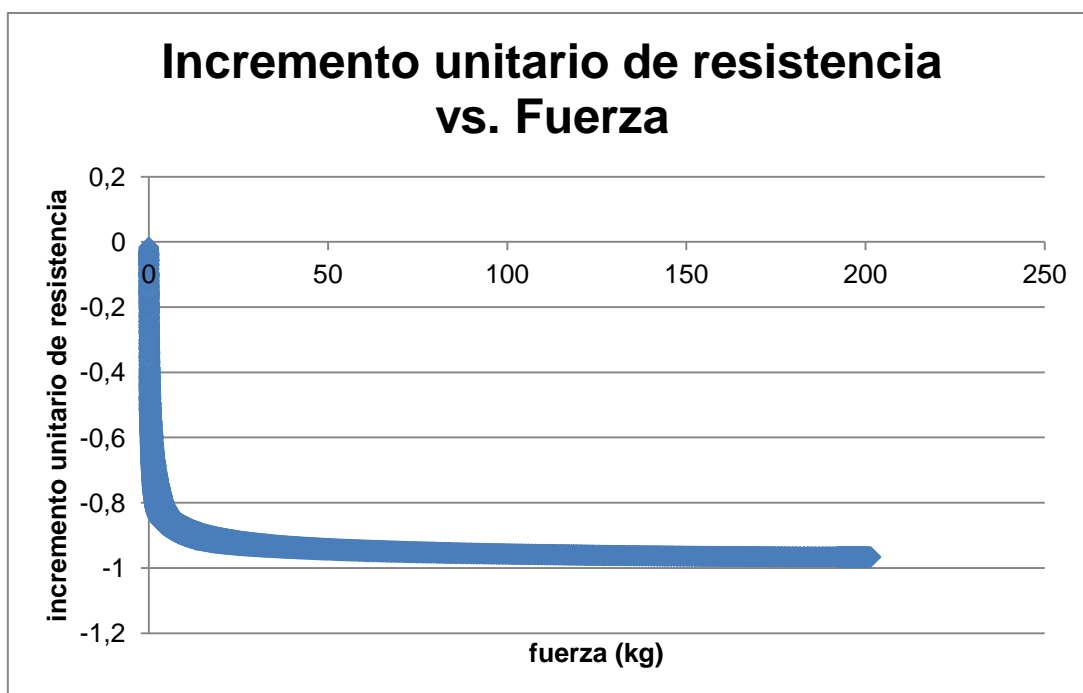
## 6 Sensor 43



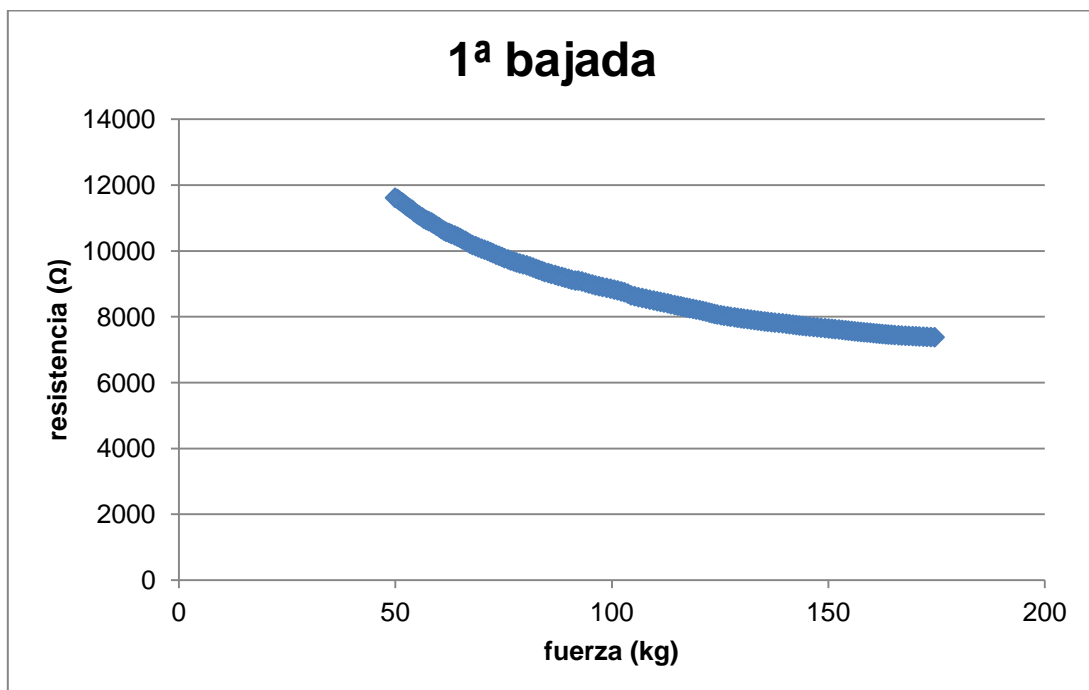
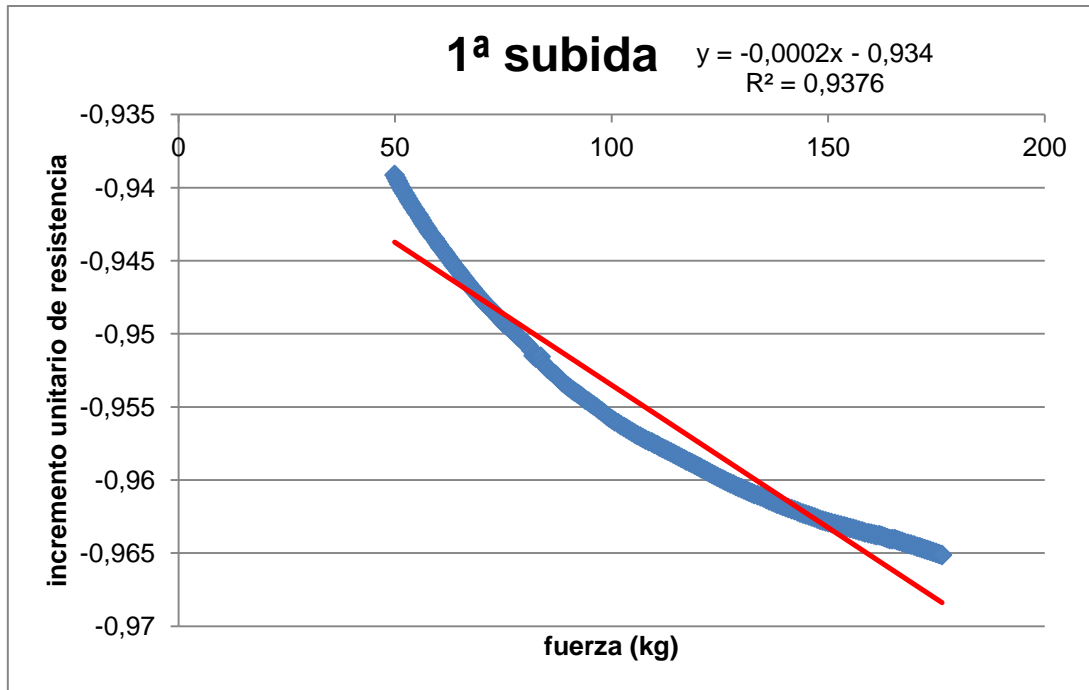
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



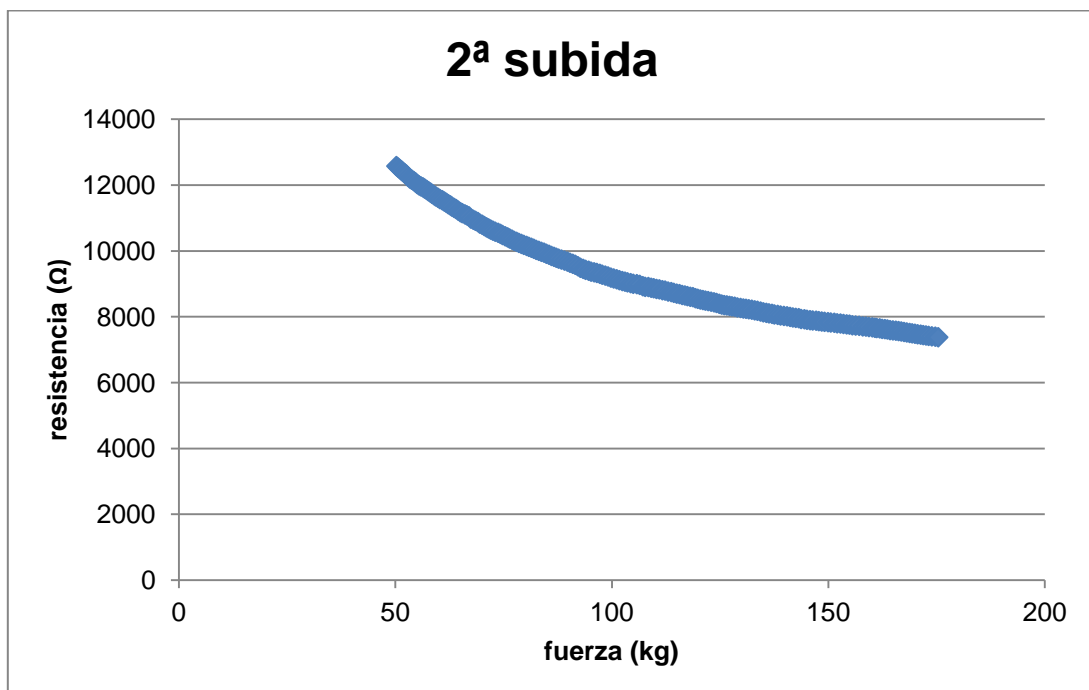
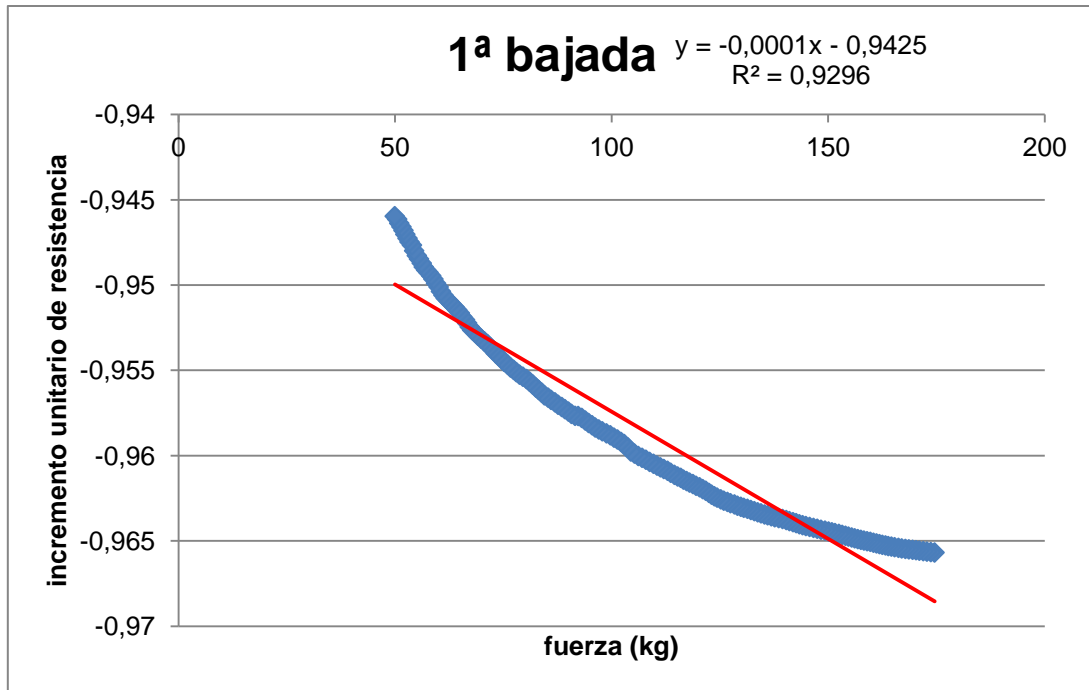
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



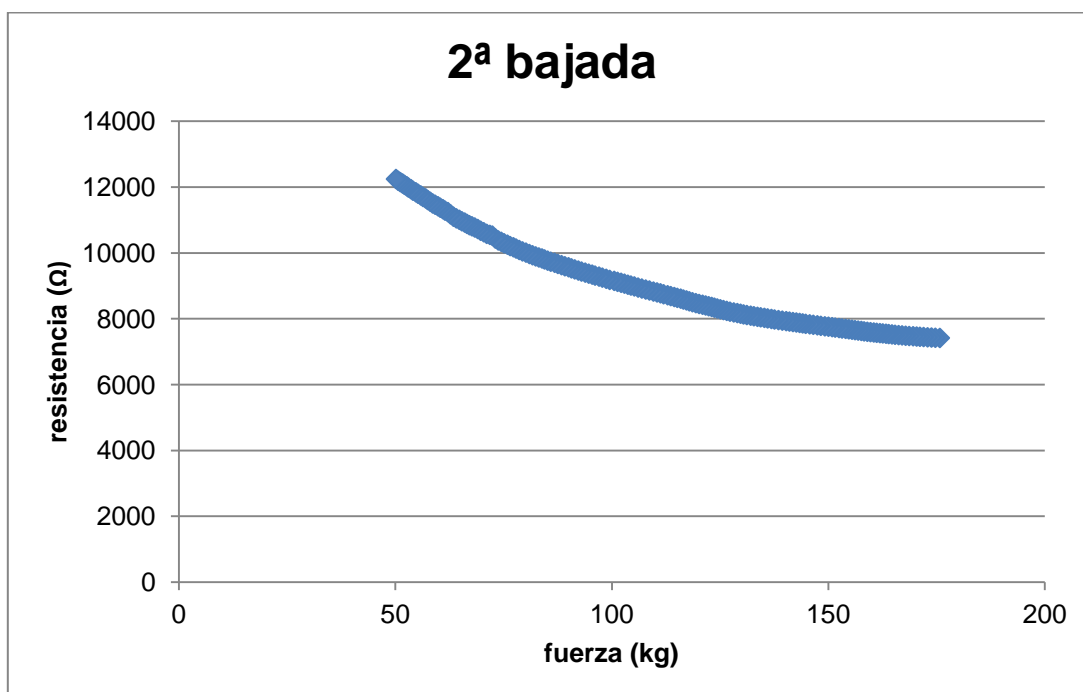
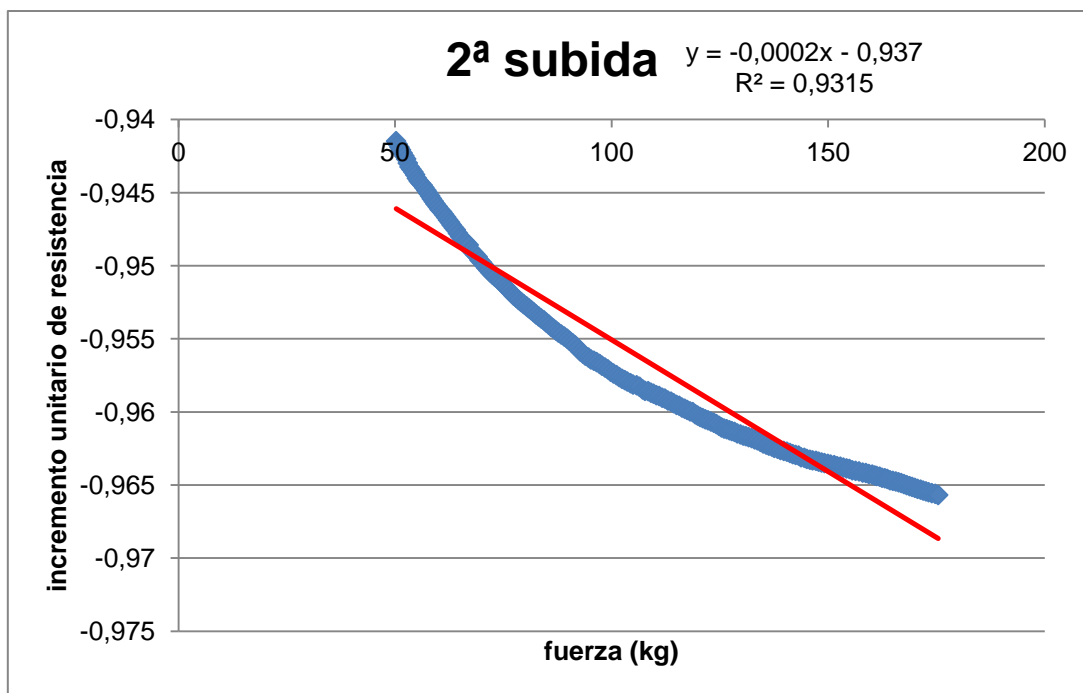
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



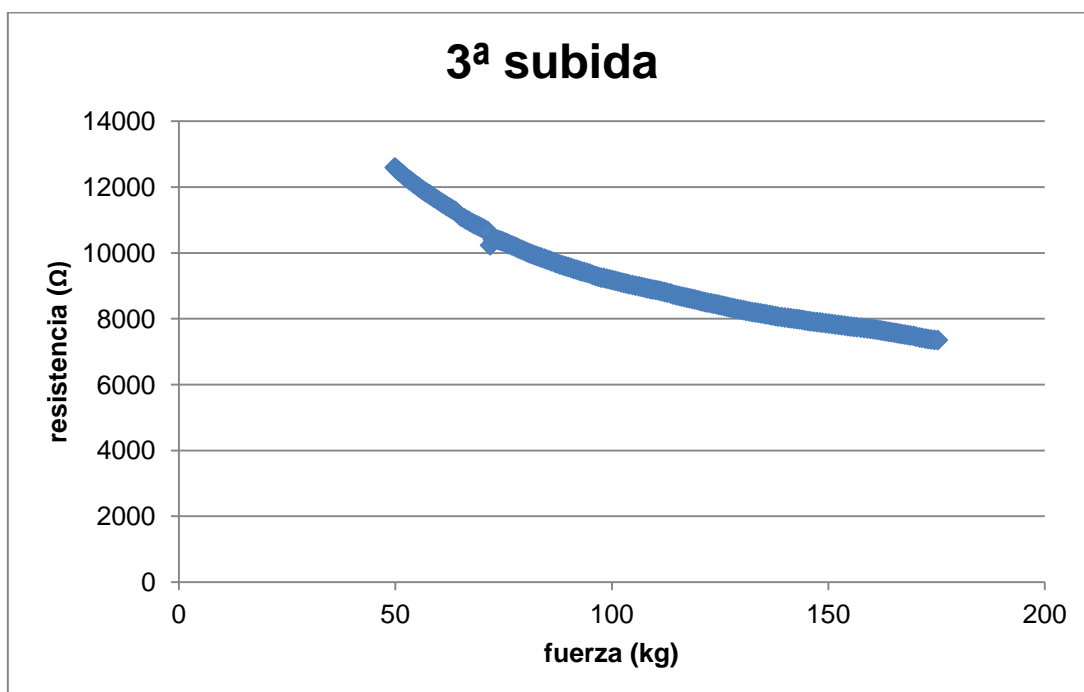
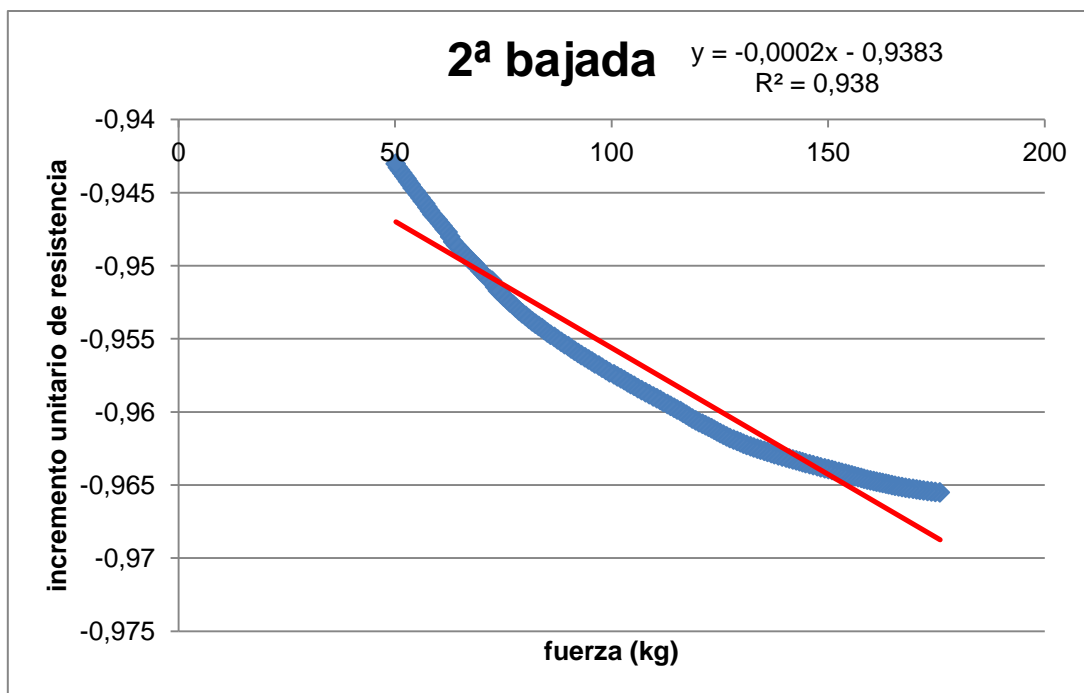
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

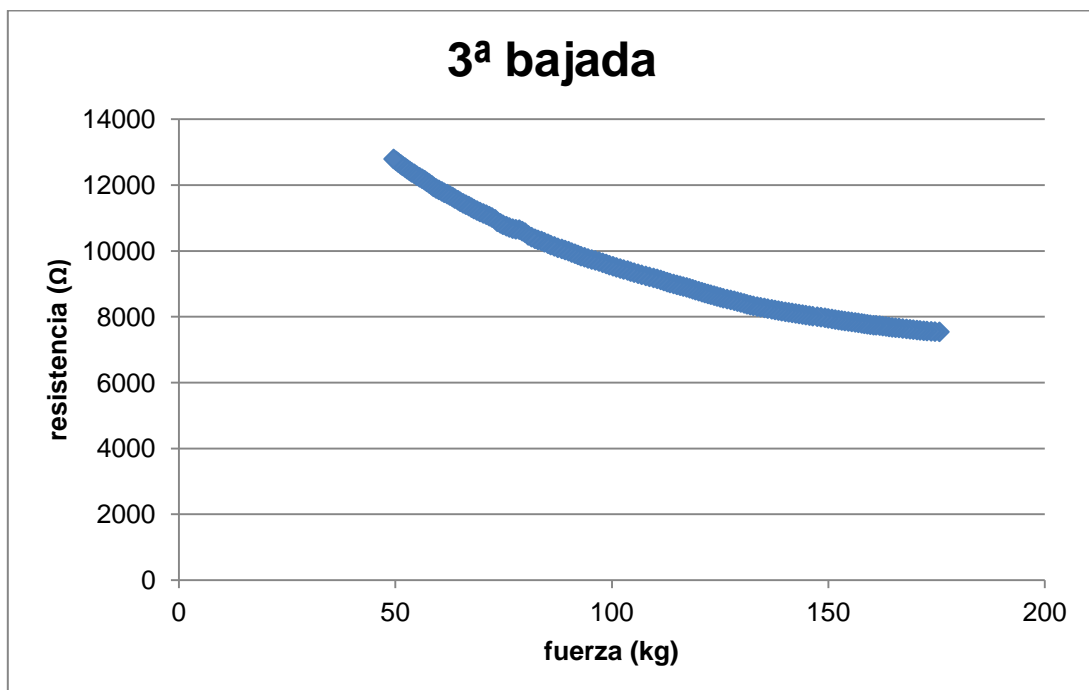
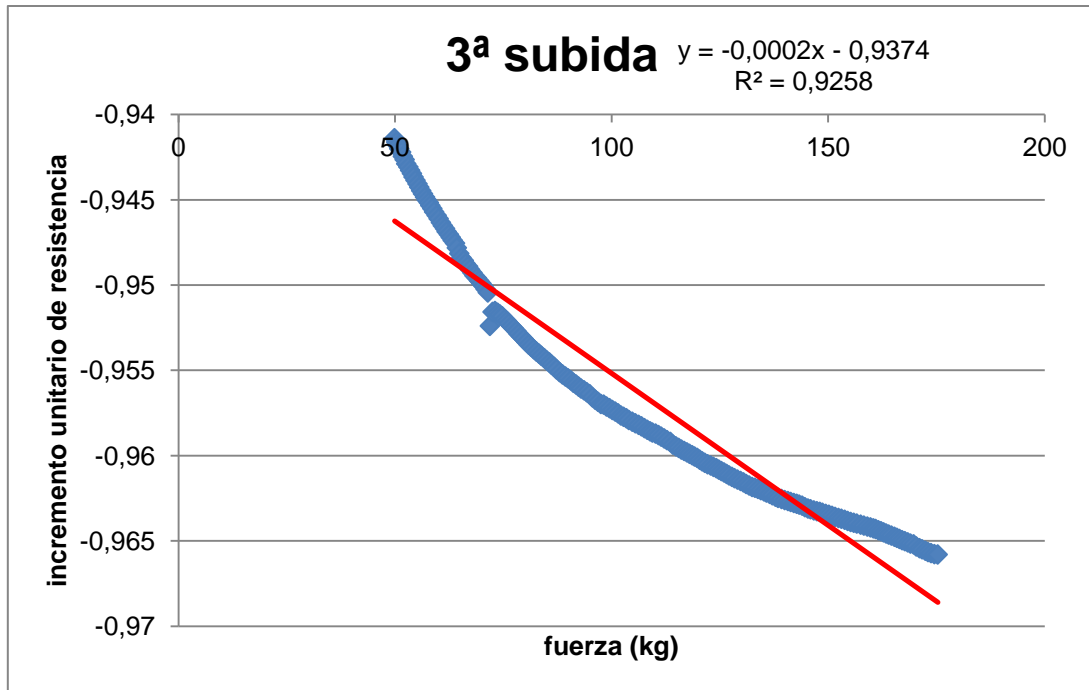


**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

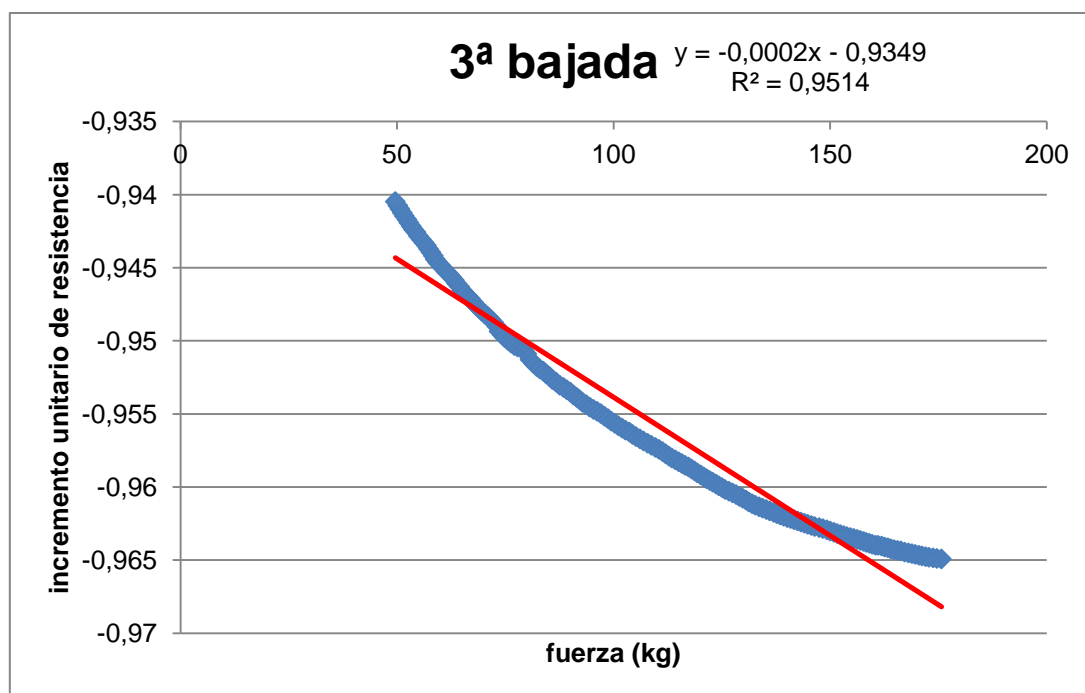




**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

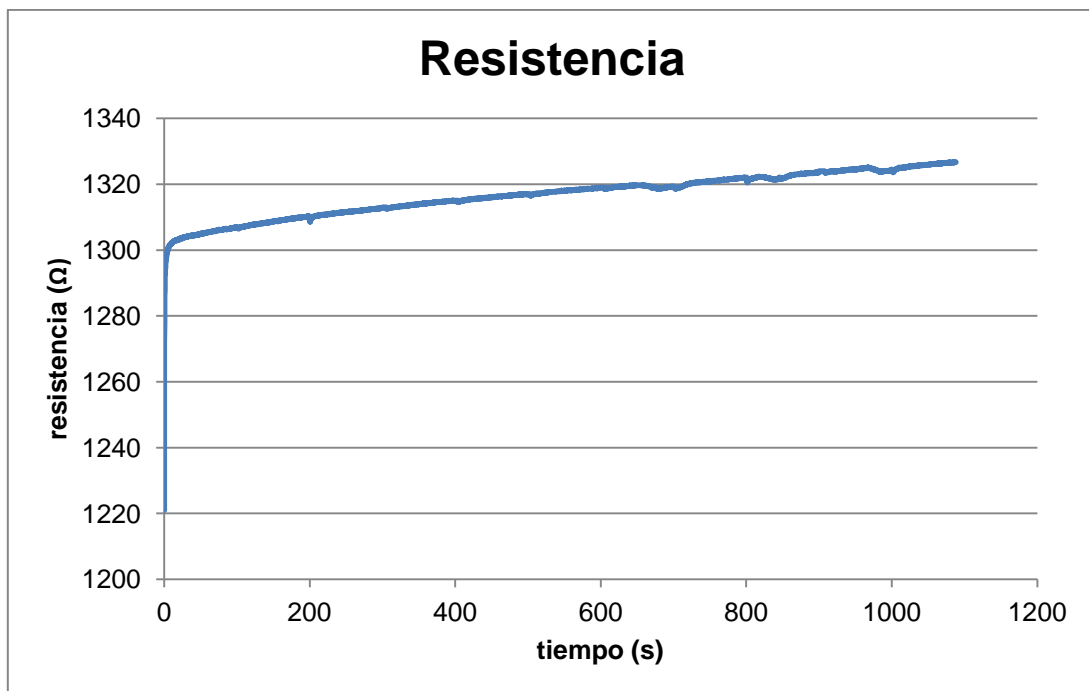
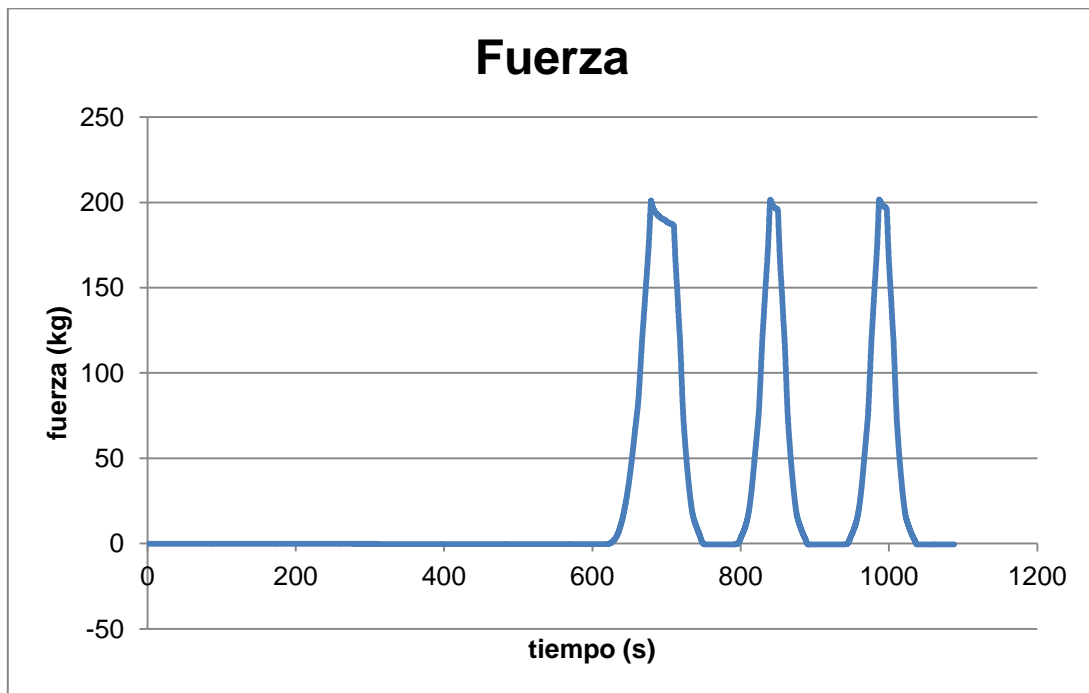


**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

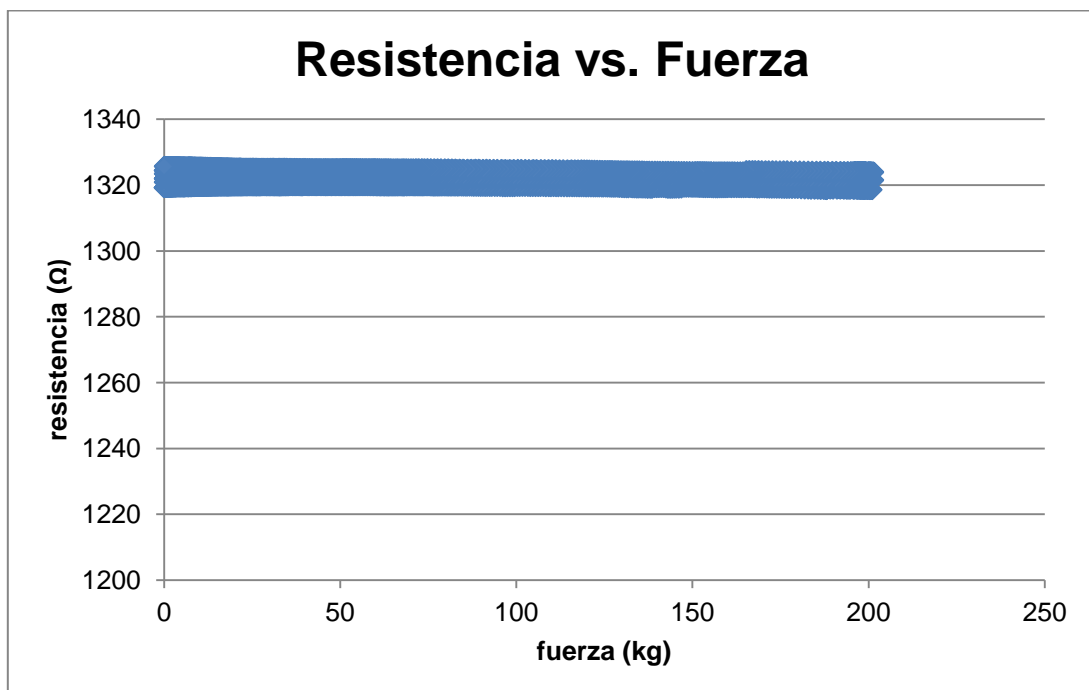
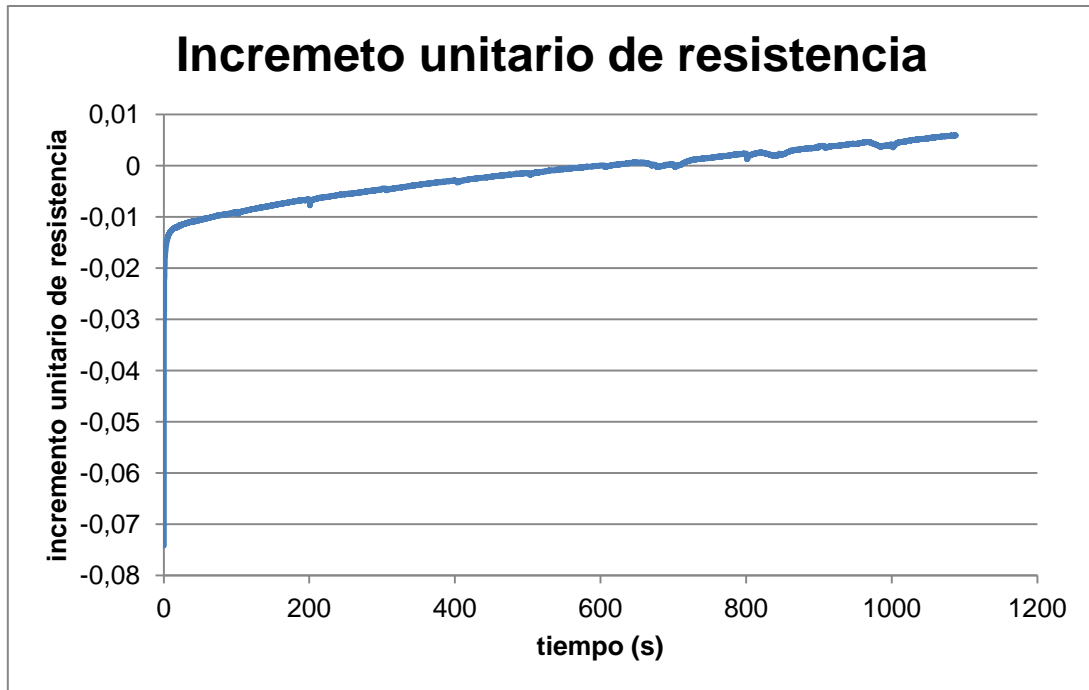


**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

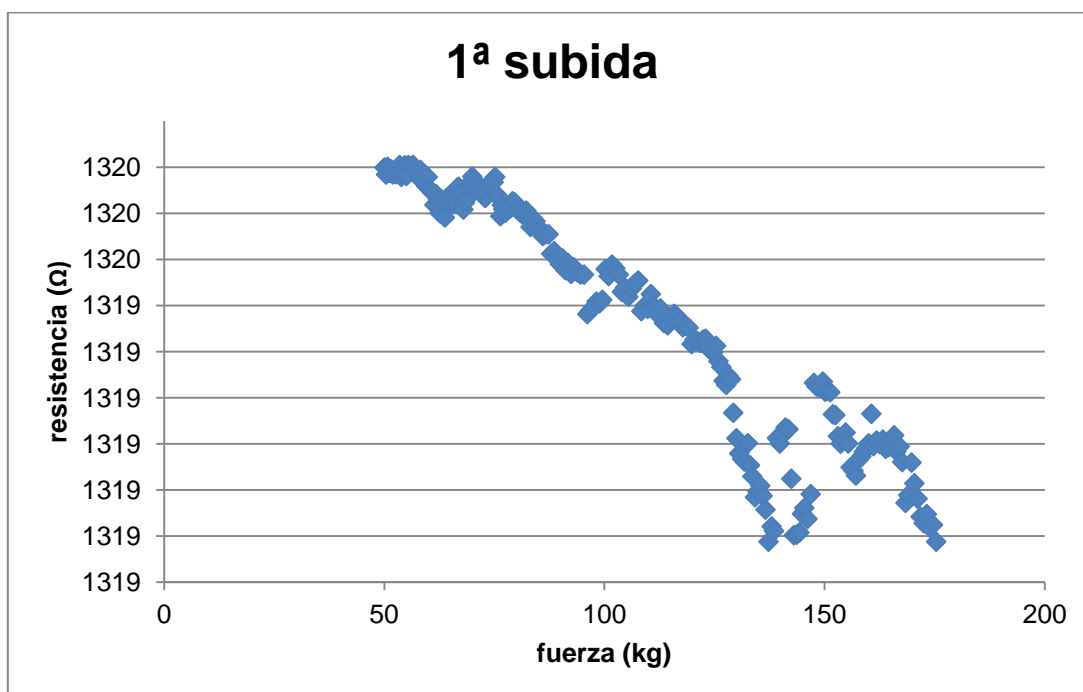
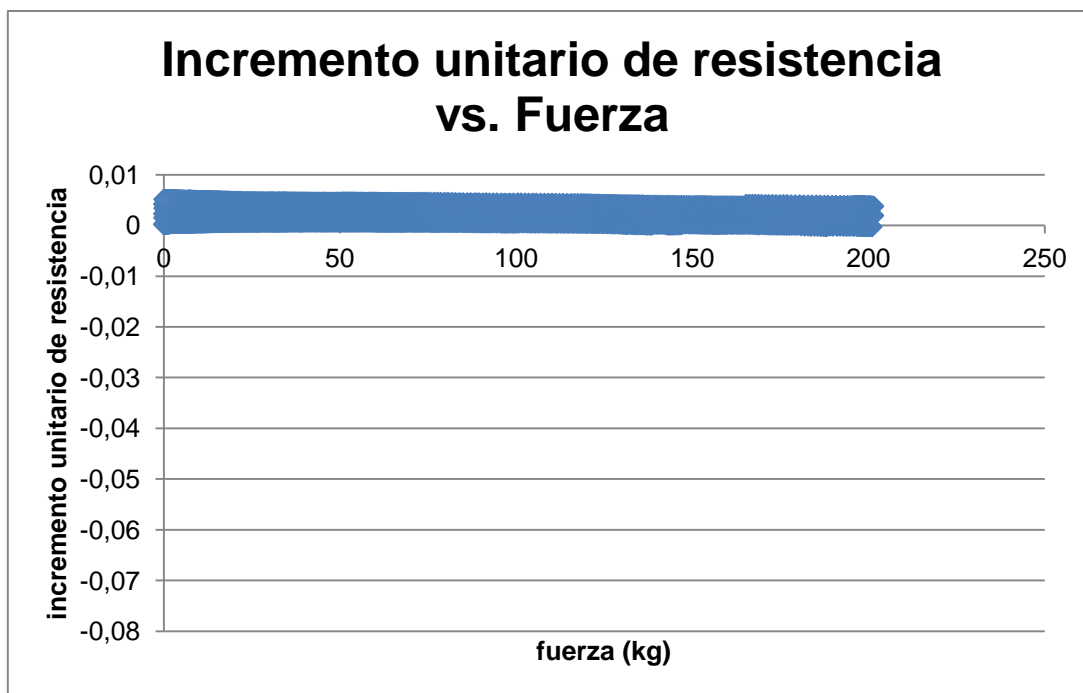
**7 Sensor 44**



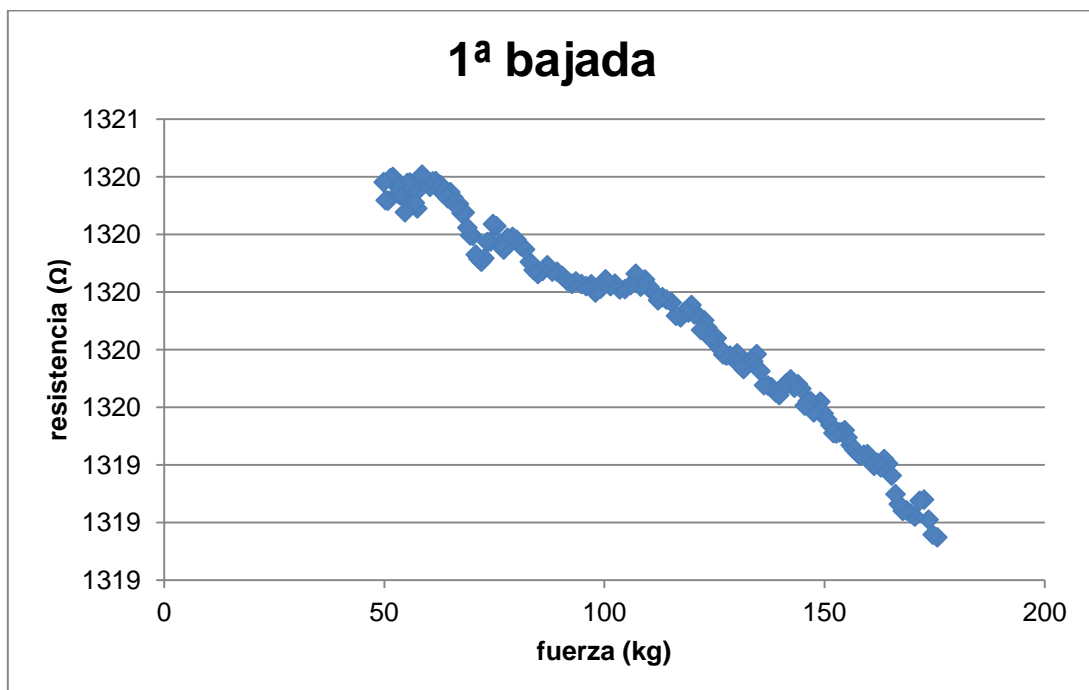
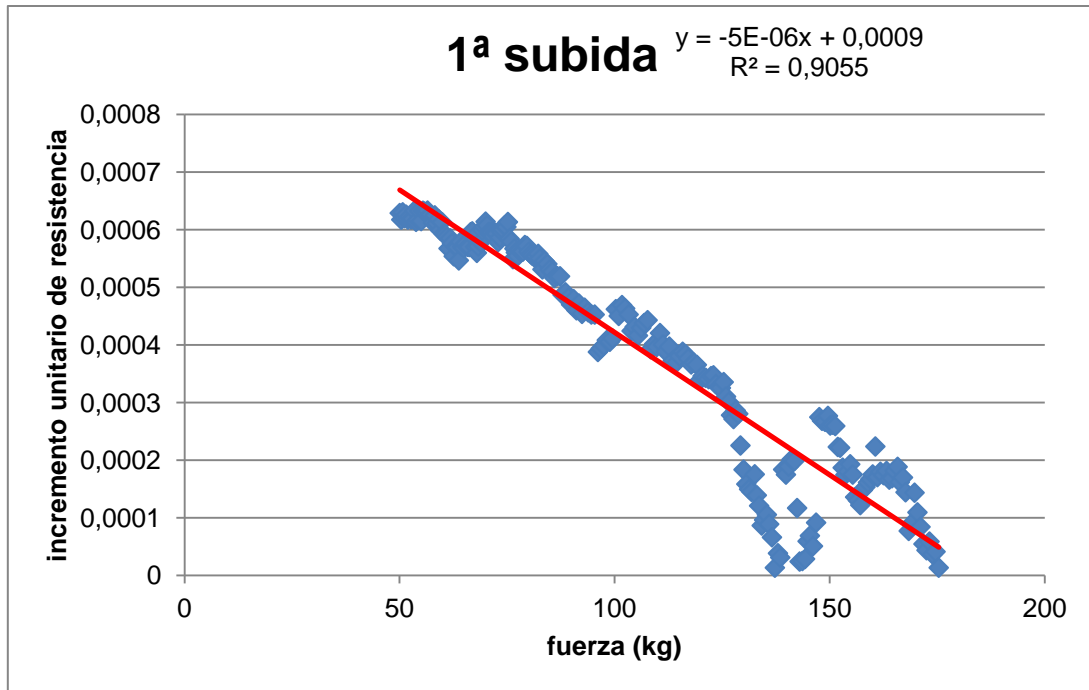
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



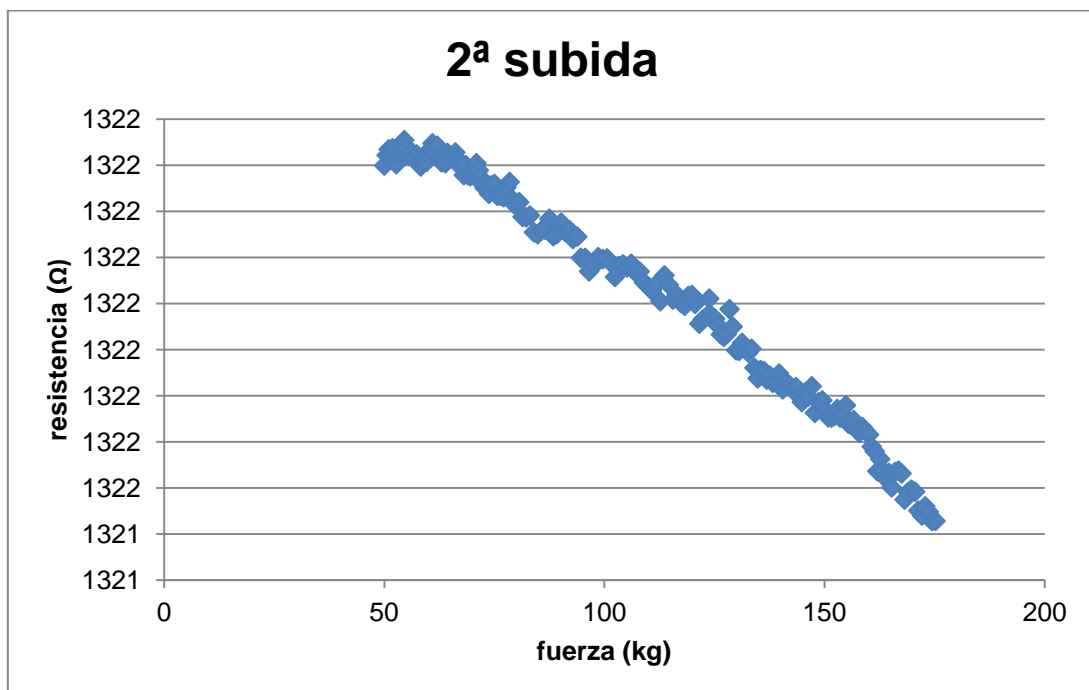
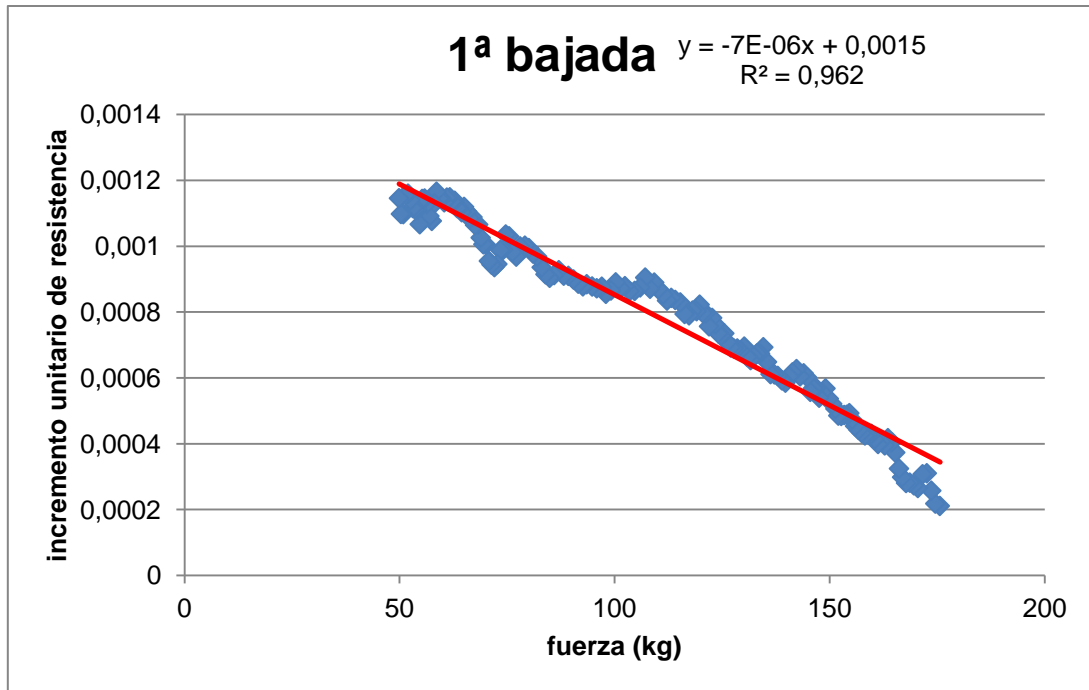
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



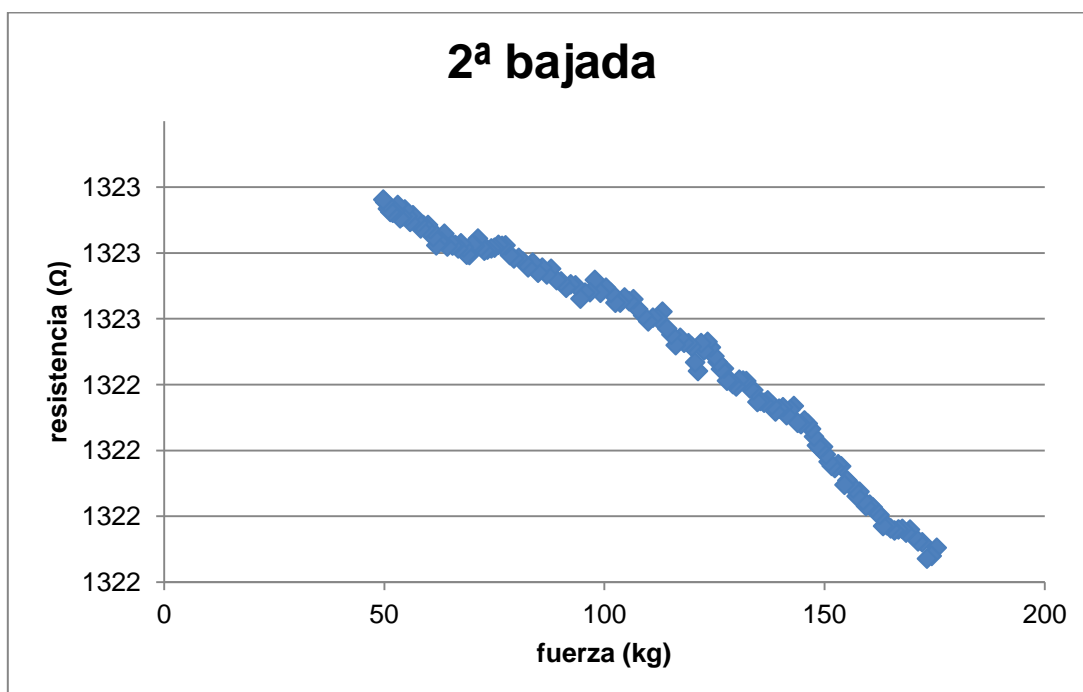
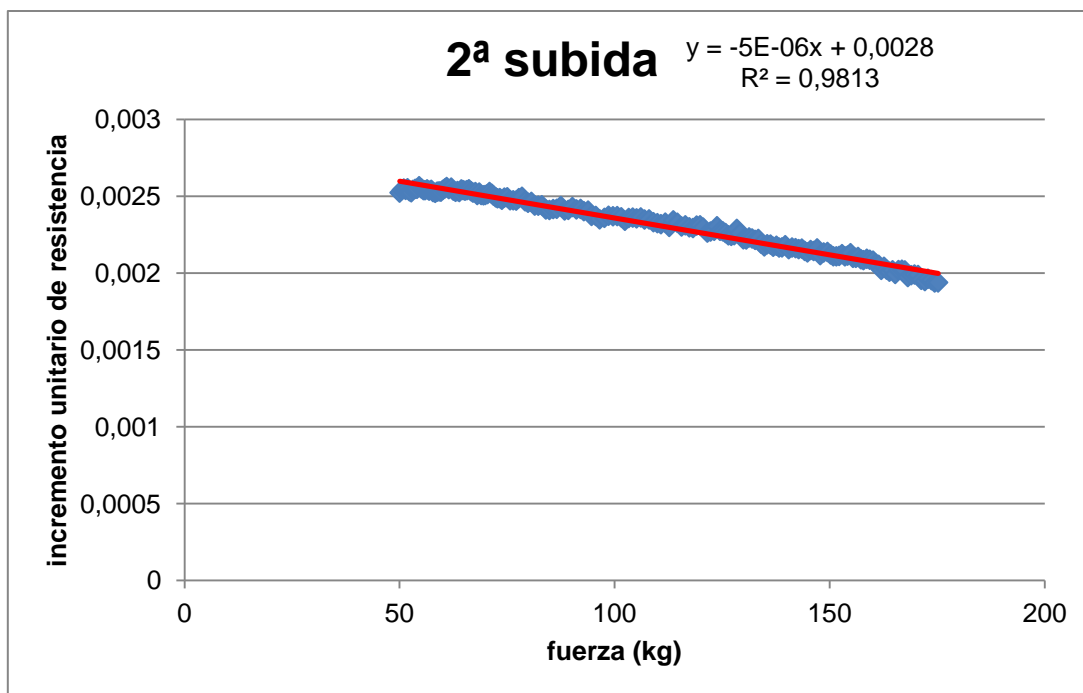
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

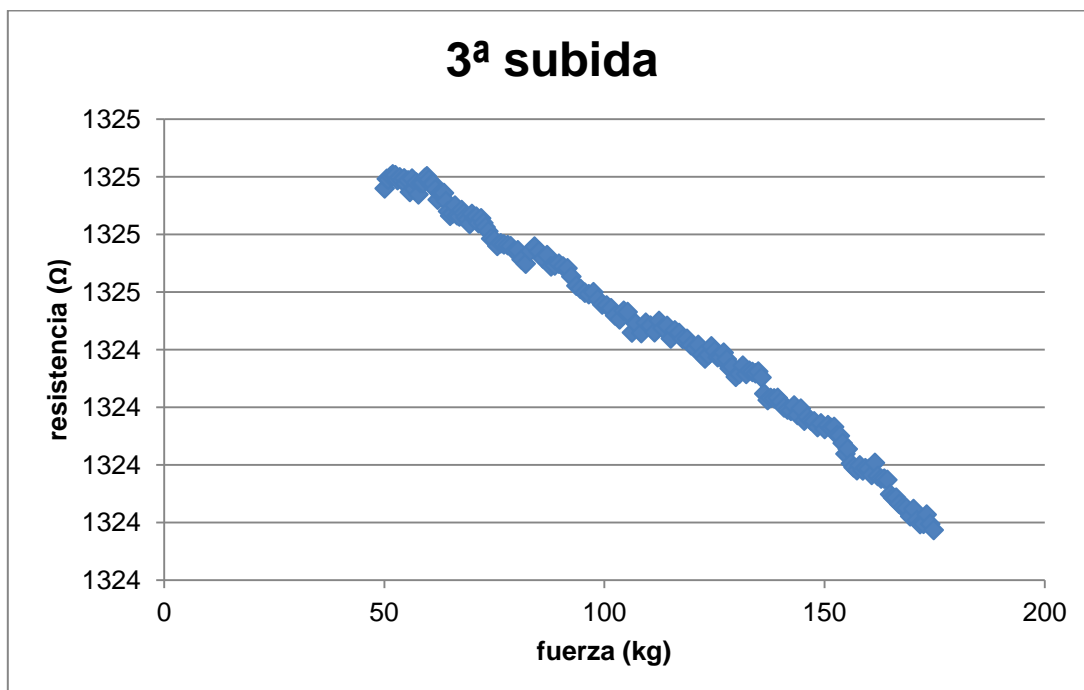
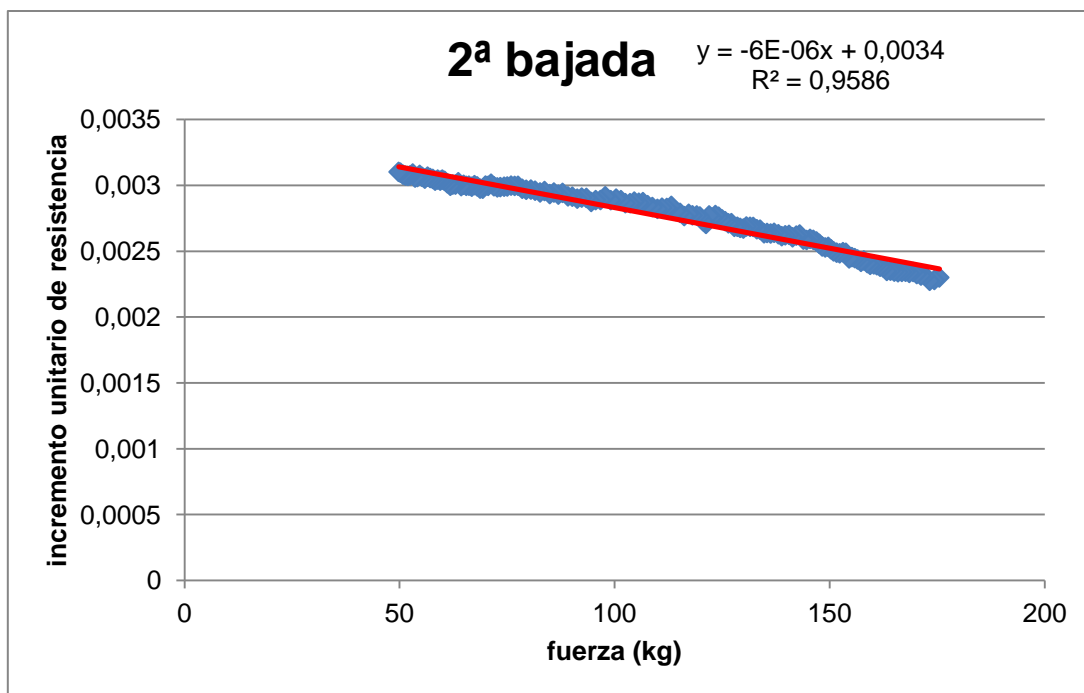


**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

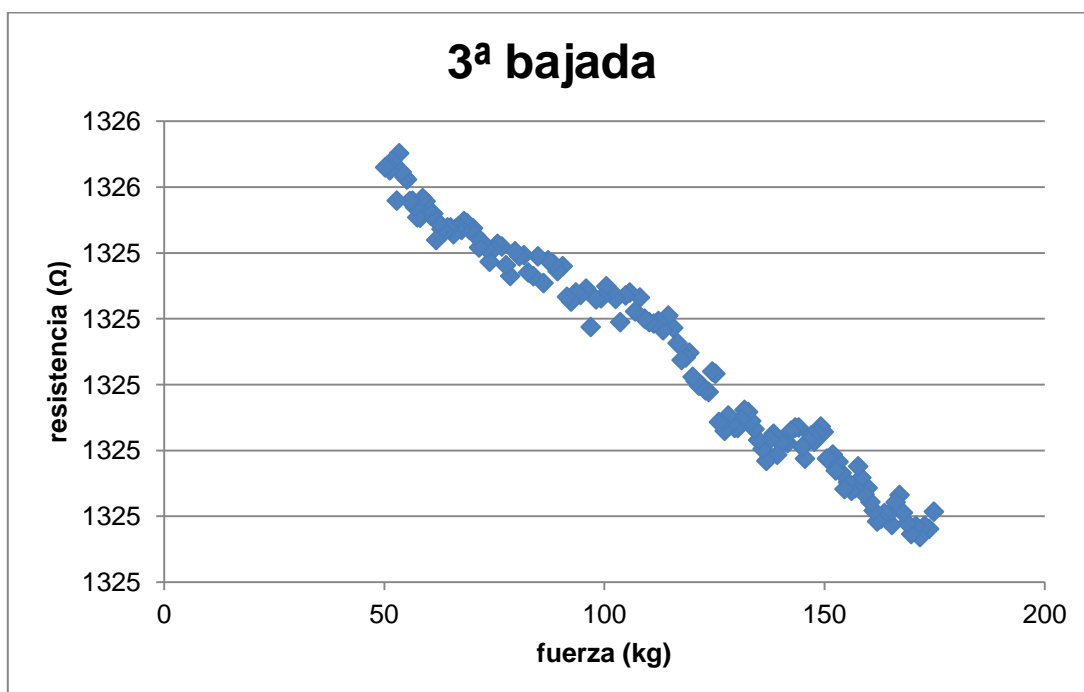
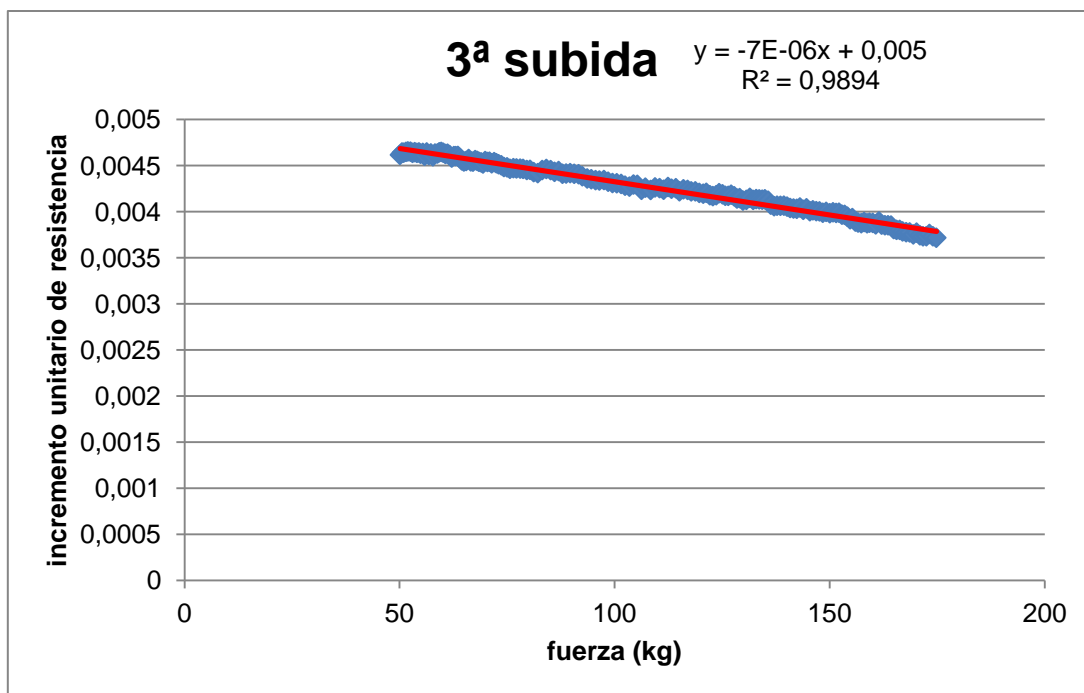




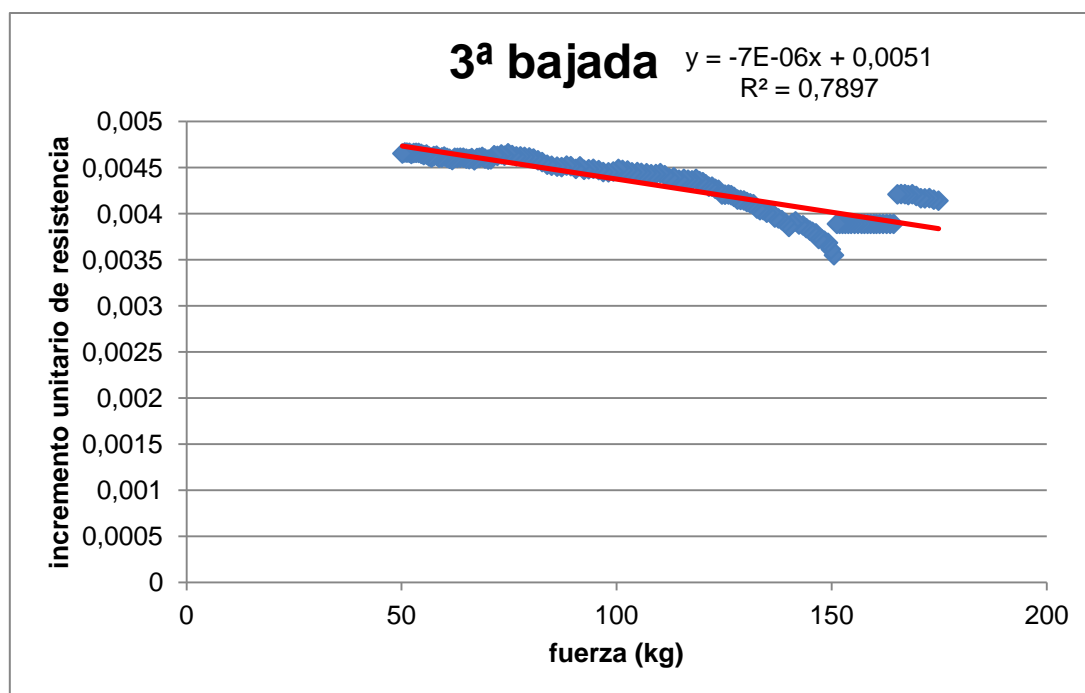
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



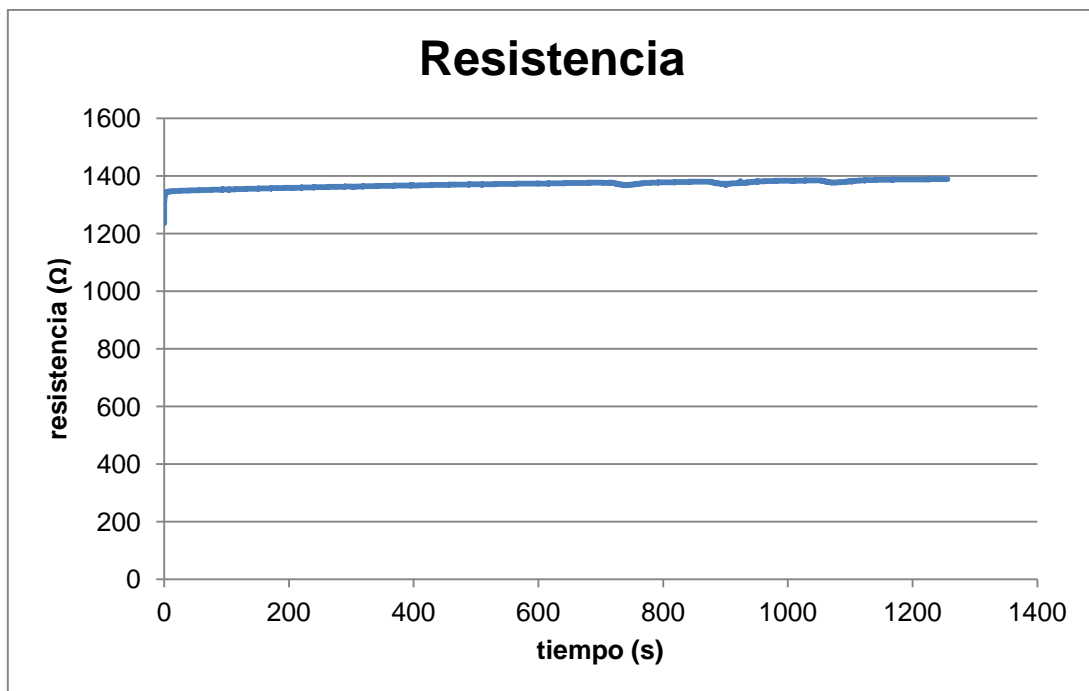
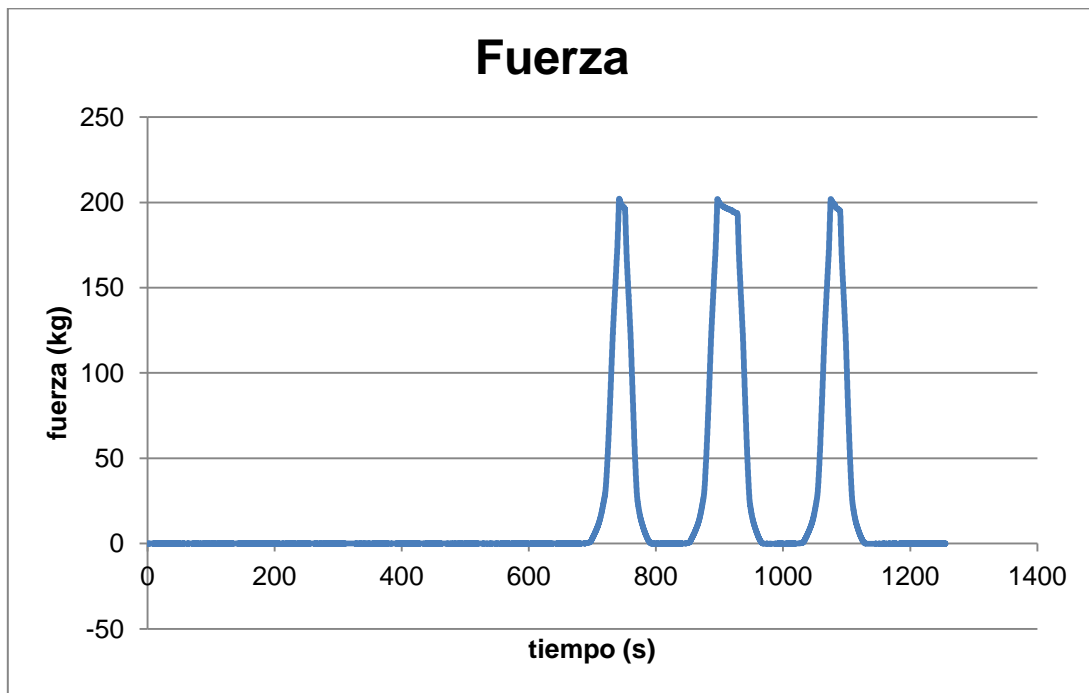
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



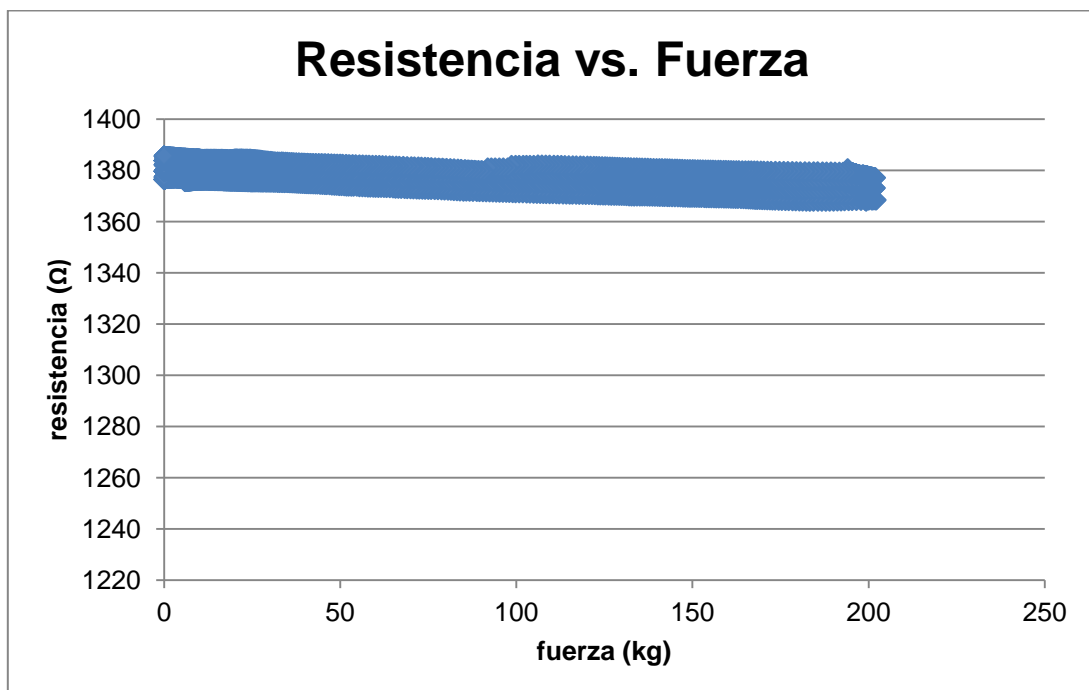
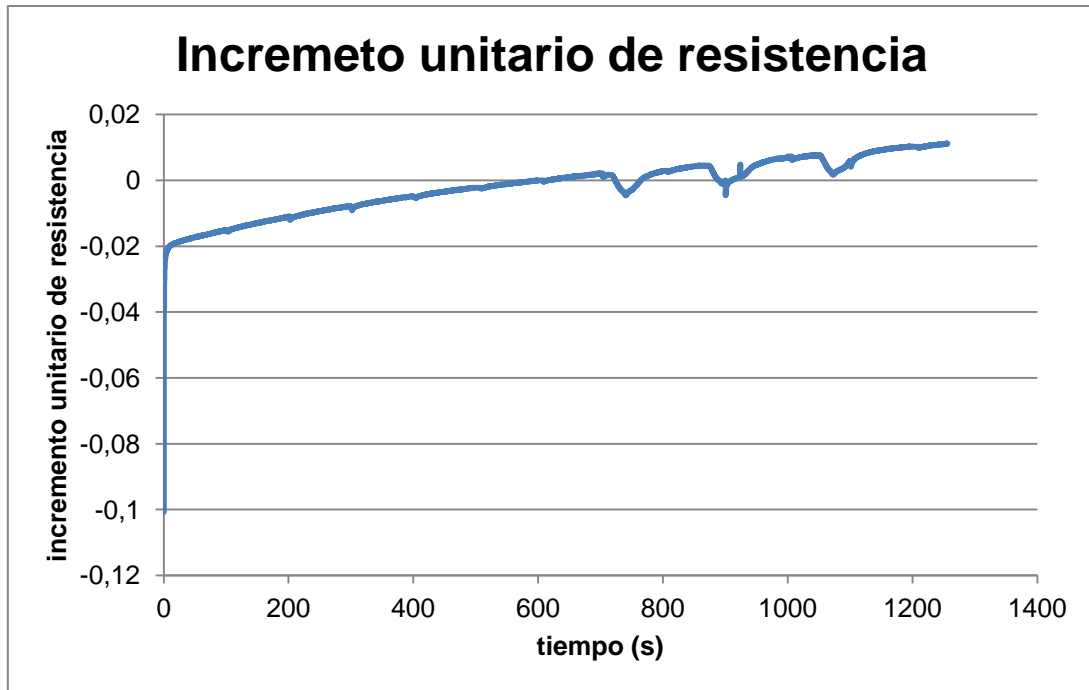
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



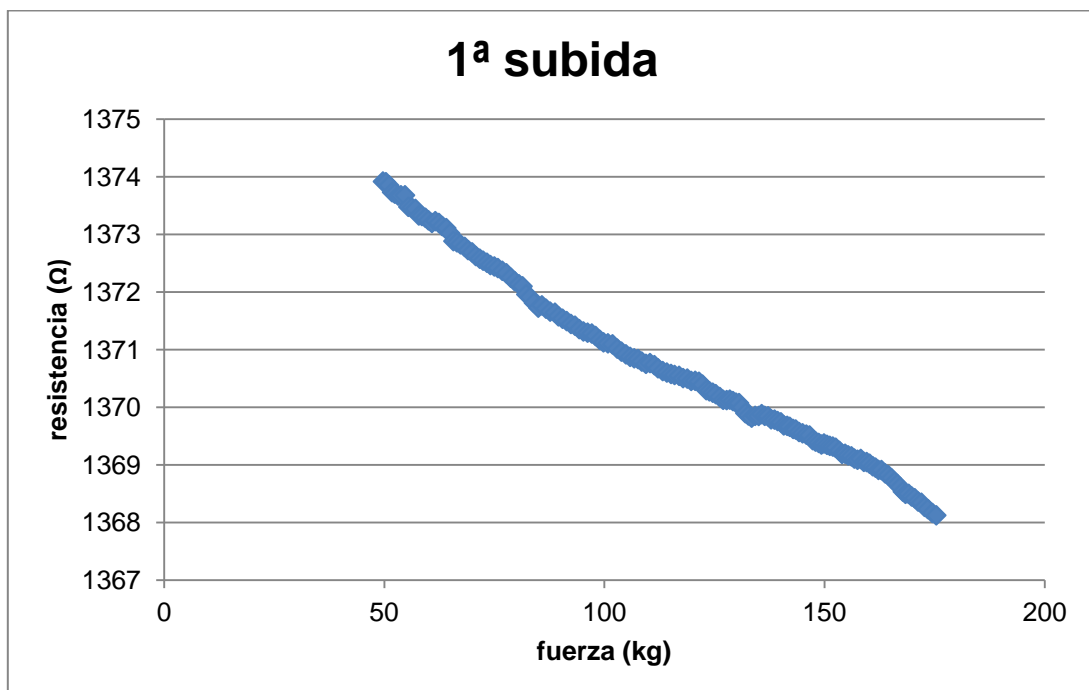
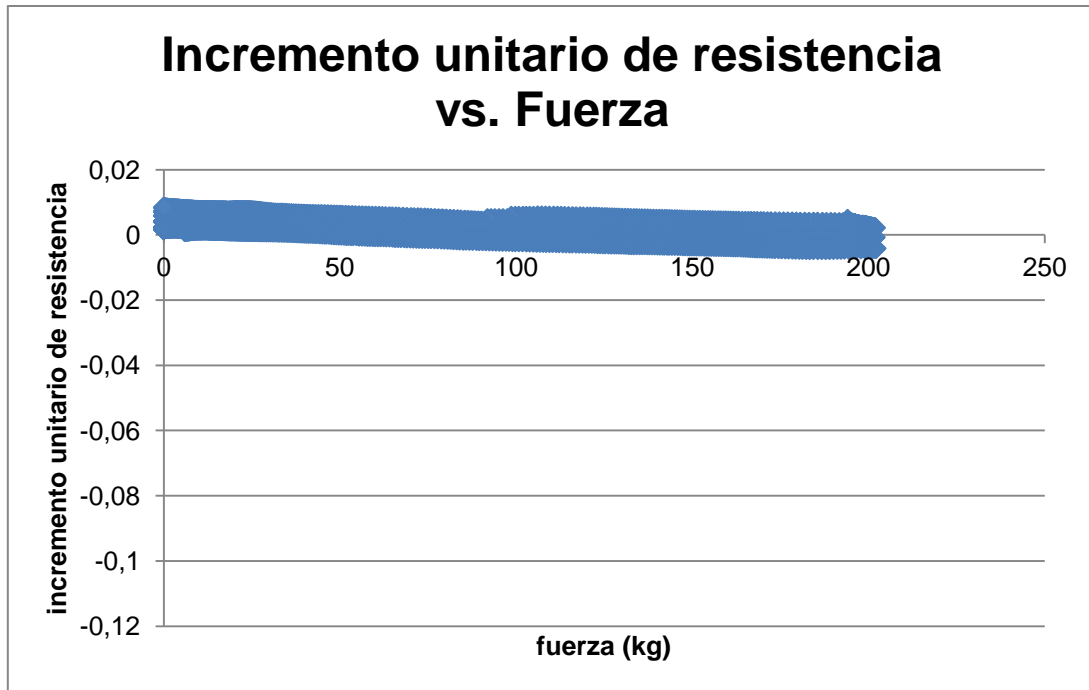
## 8 Sensor 45



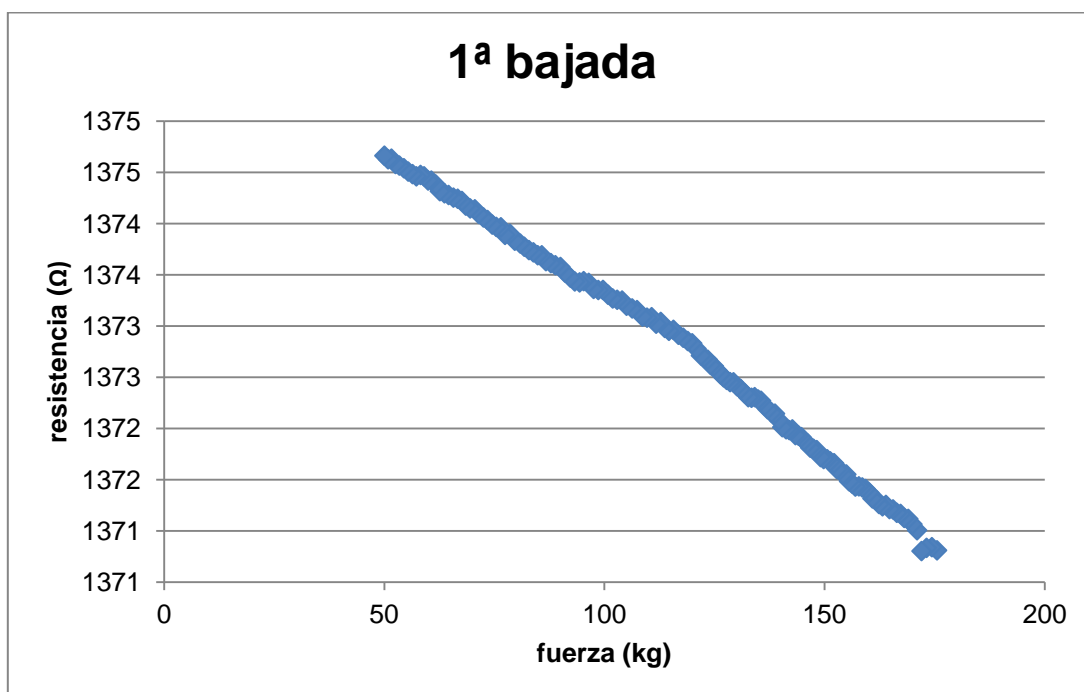
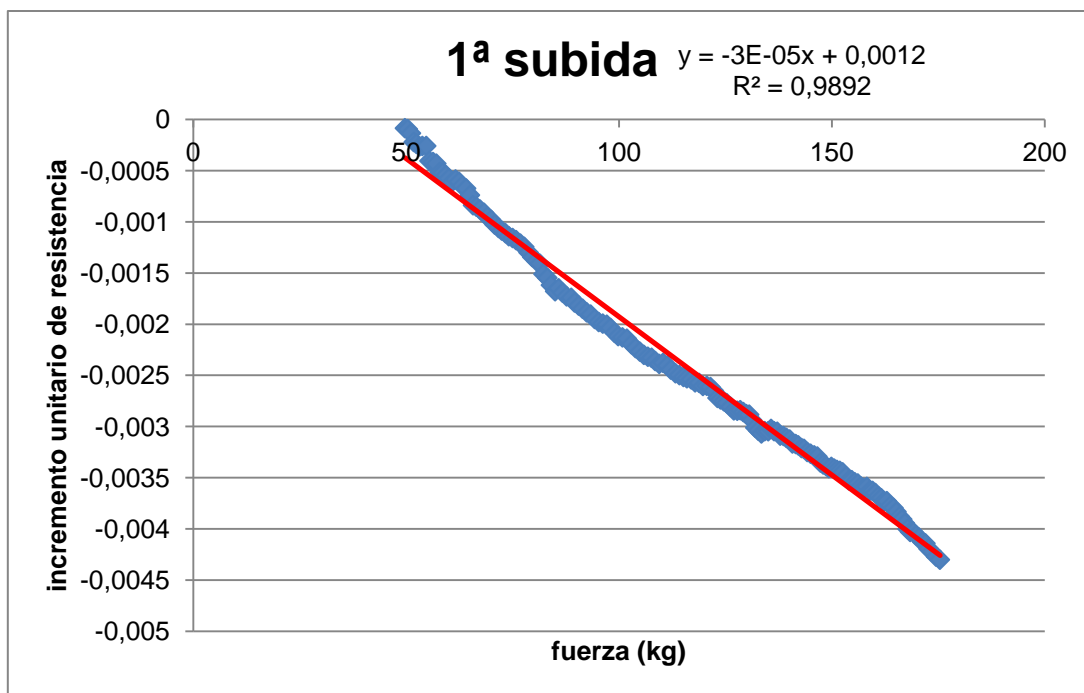
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



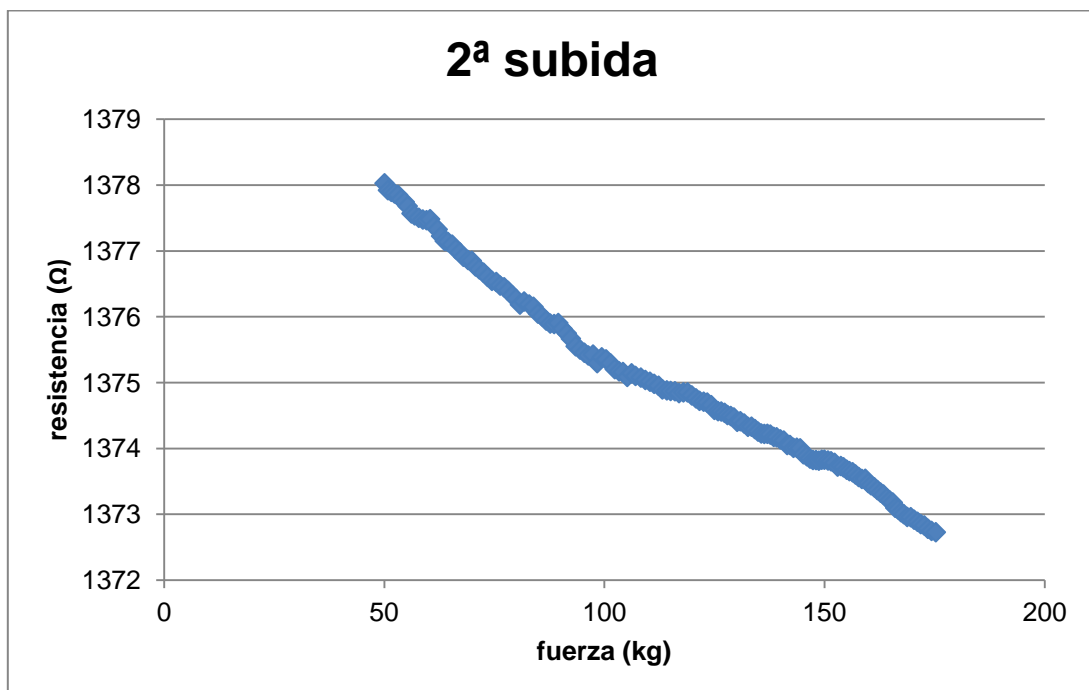
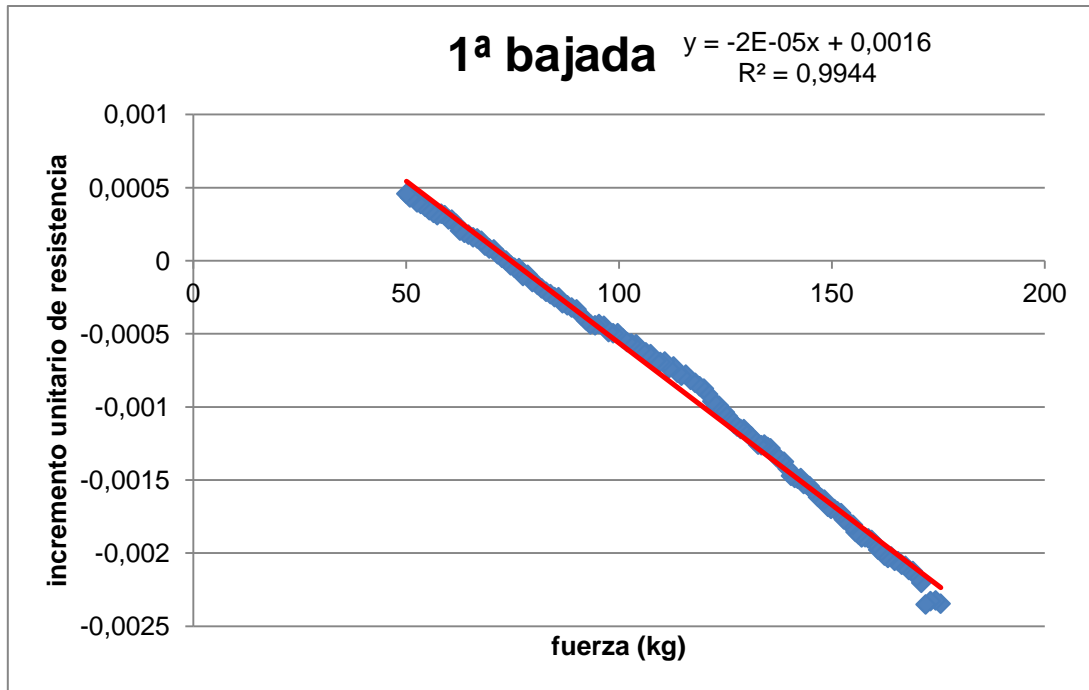
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

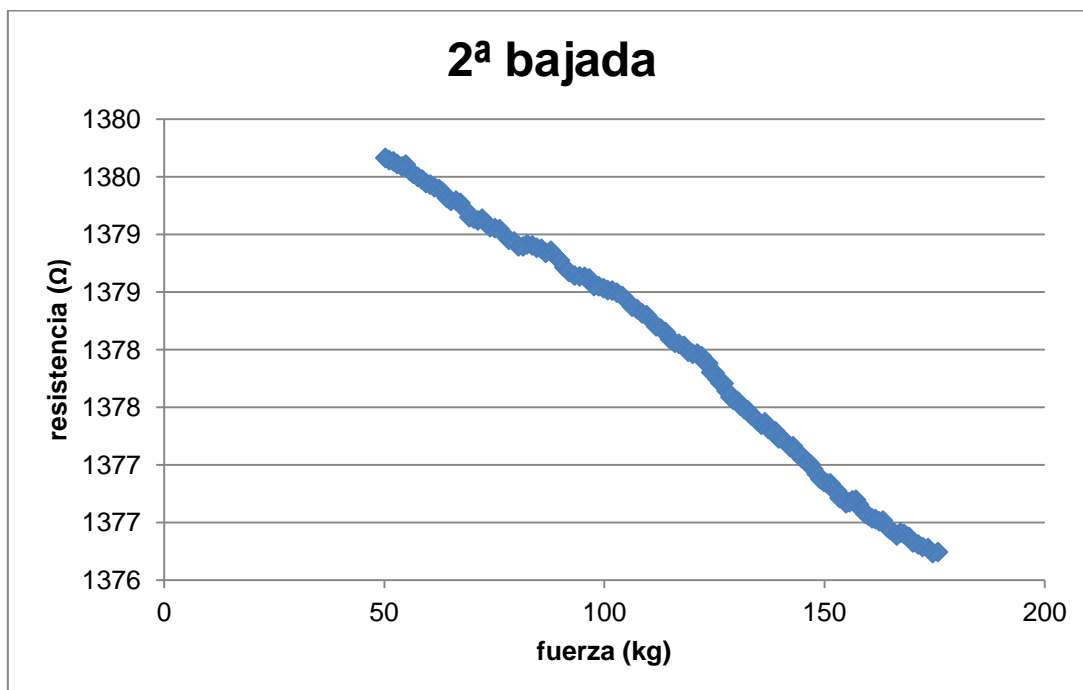
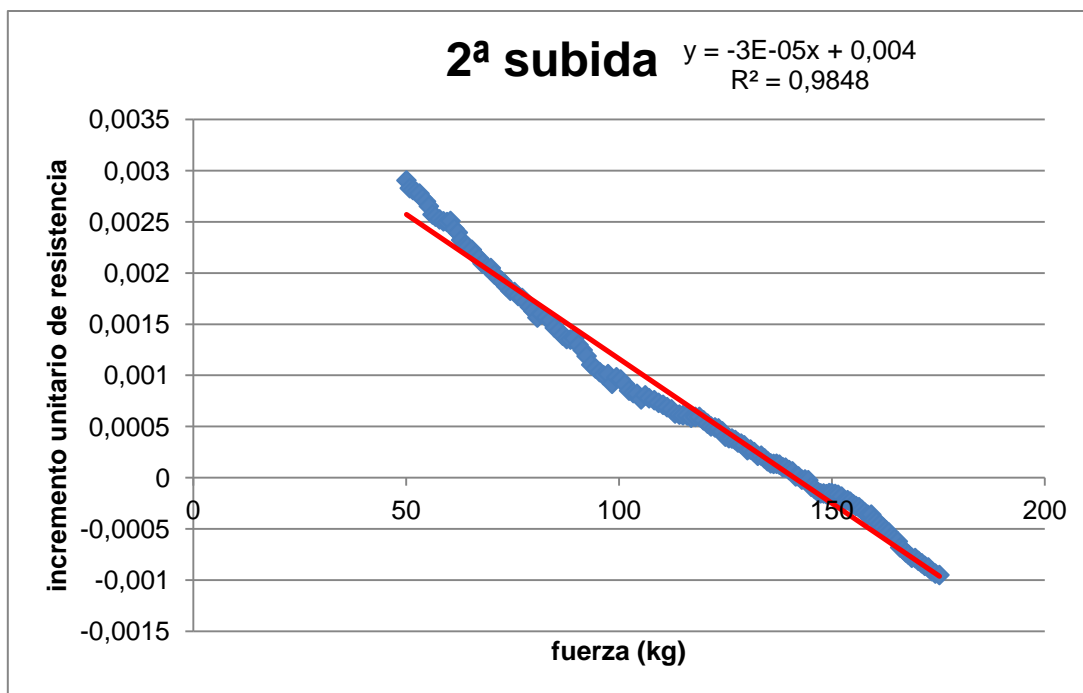


**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

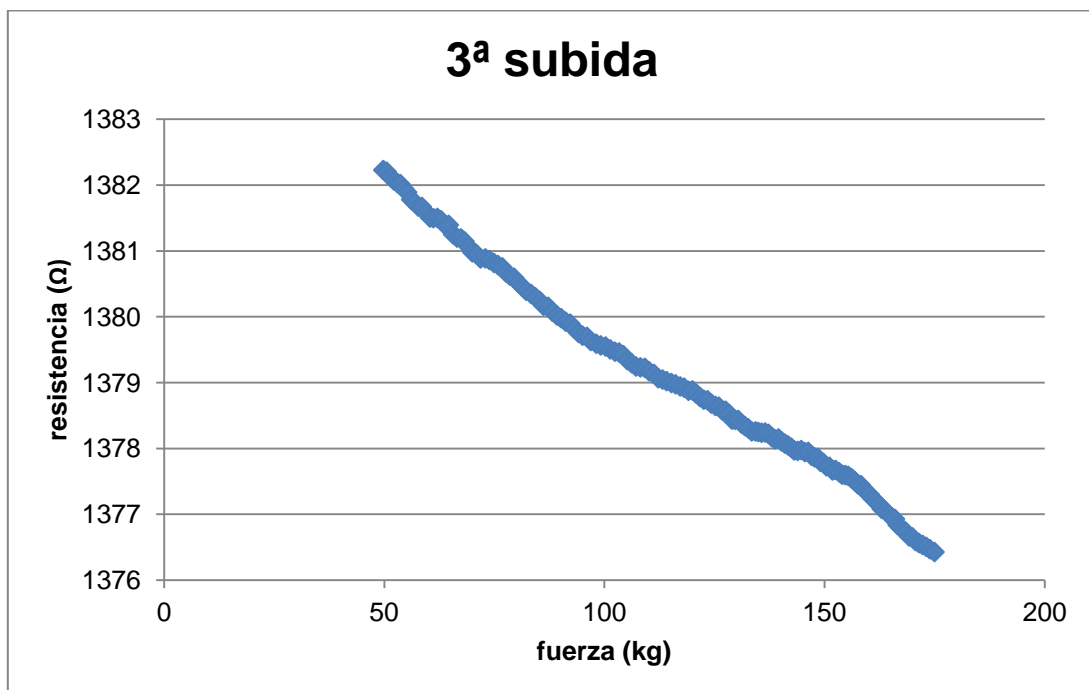
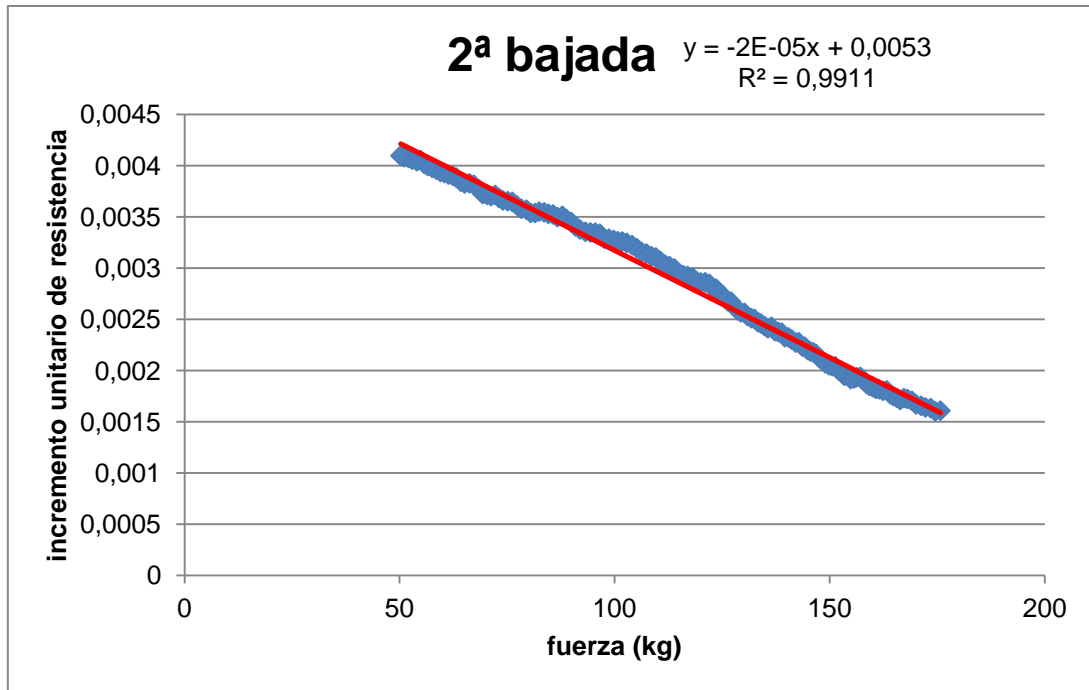




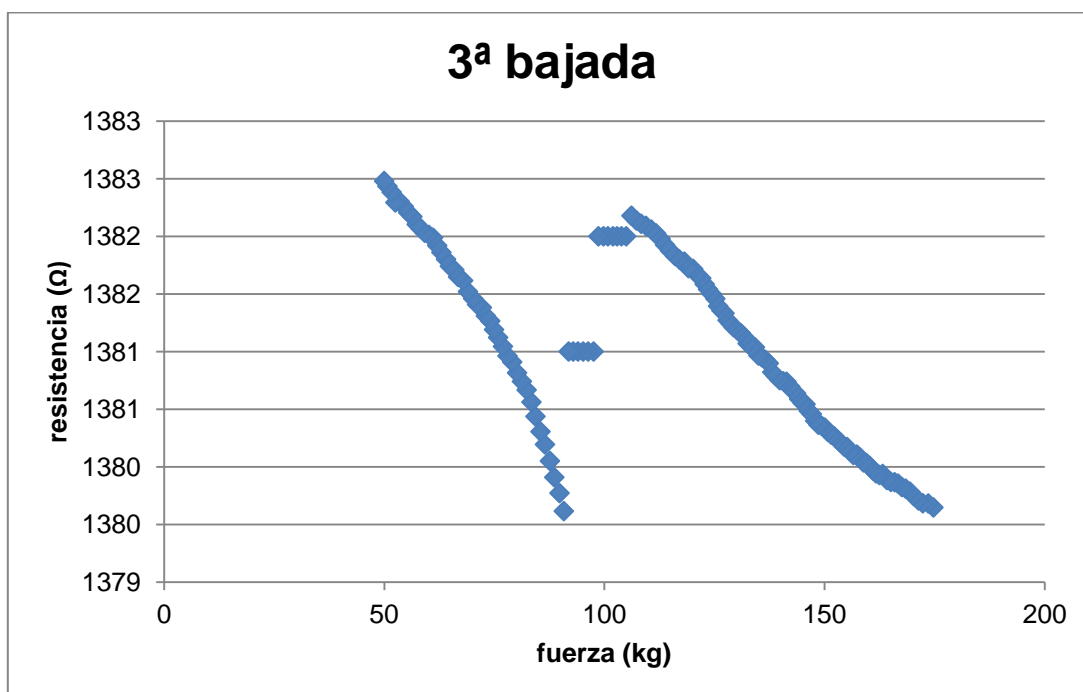
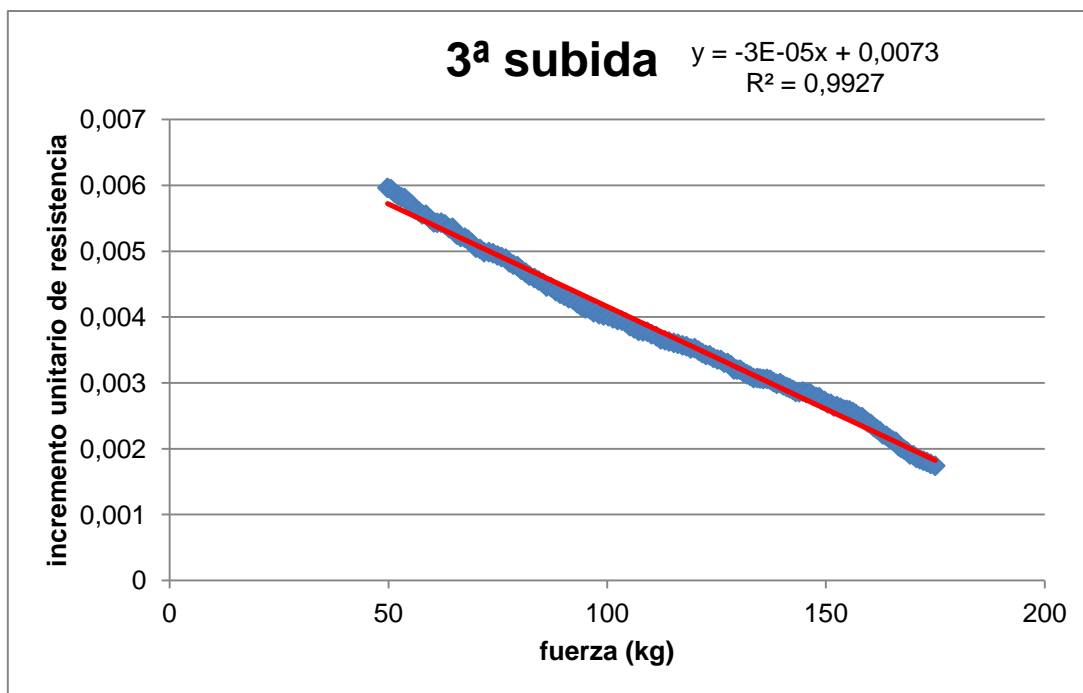
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



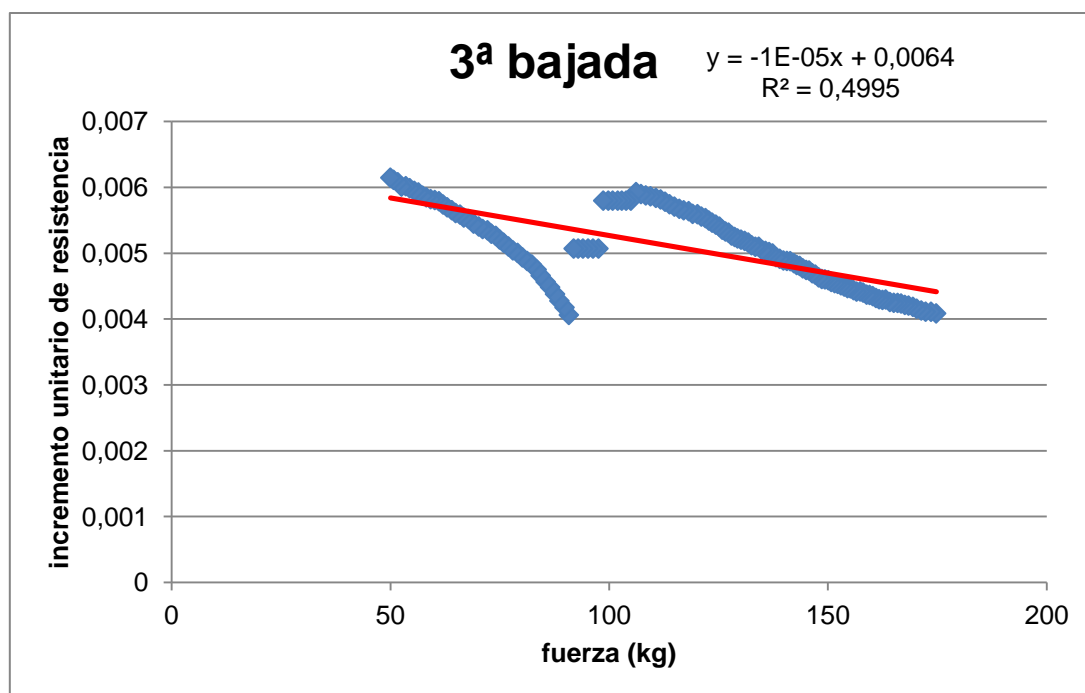
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



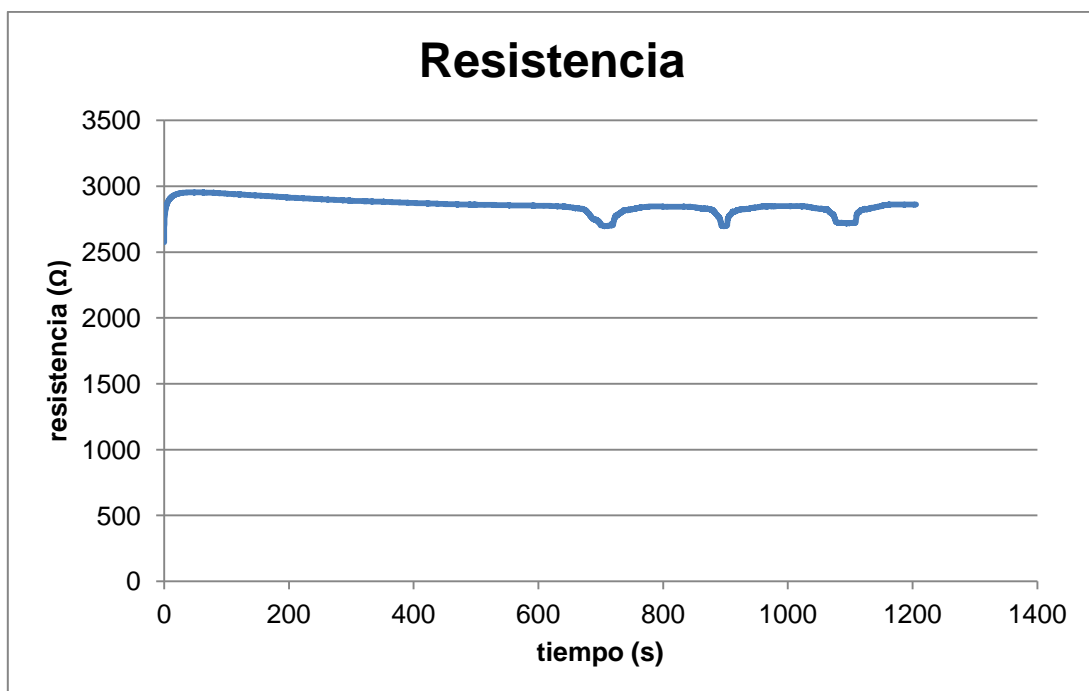
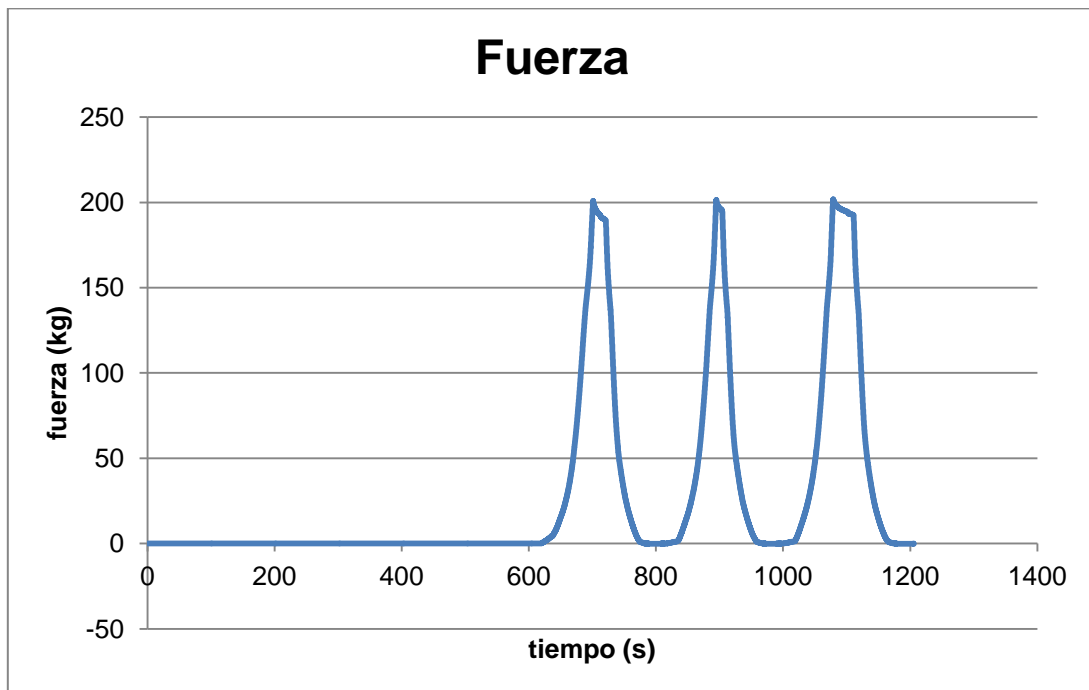
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



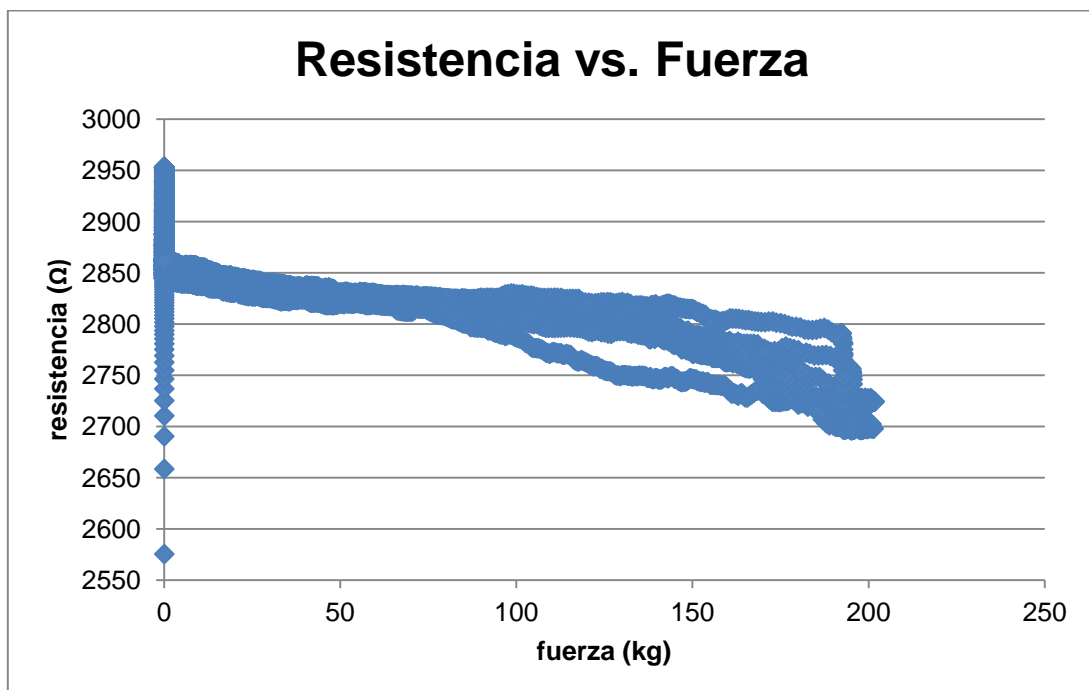
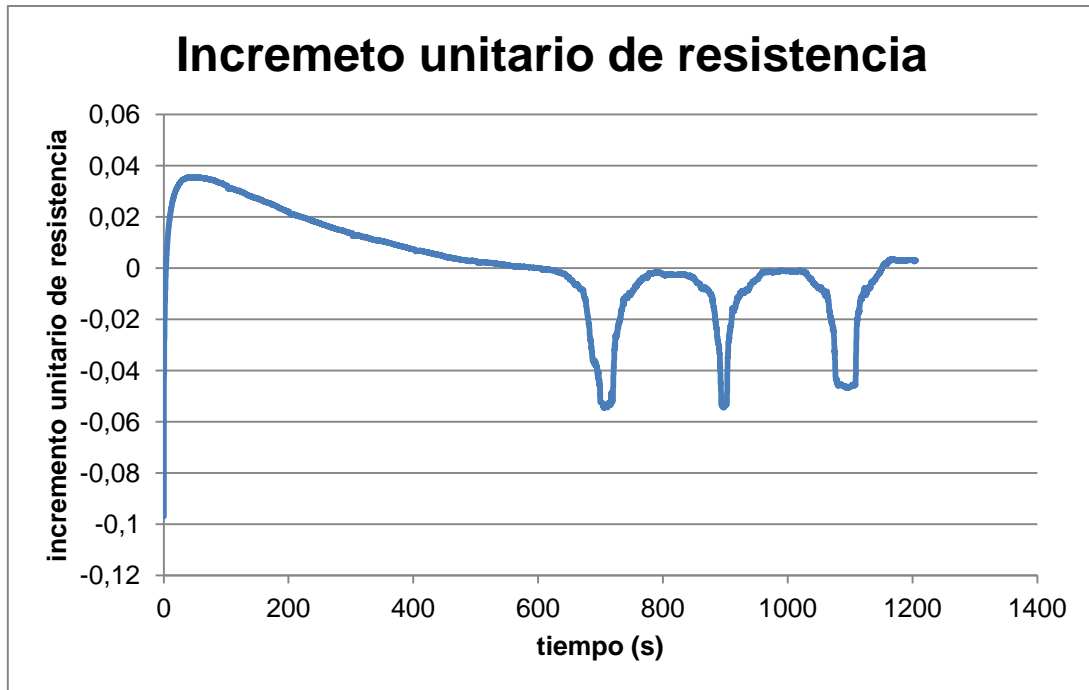
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



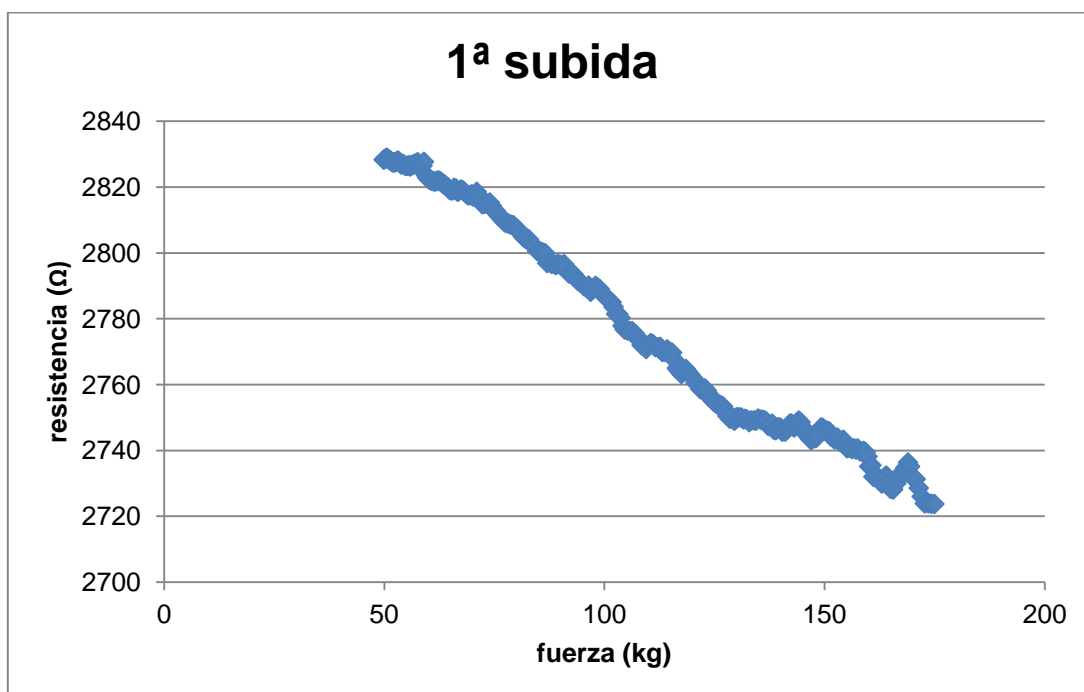
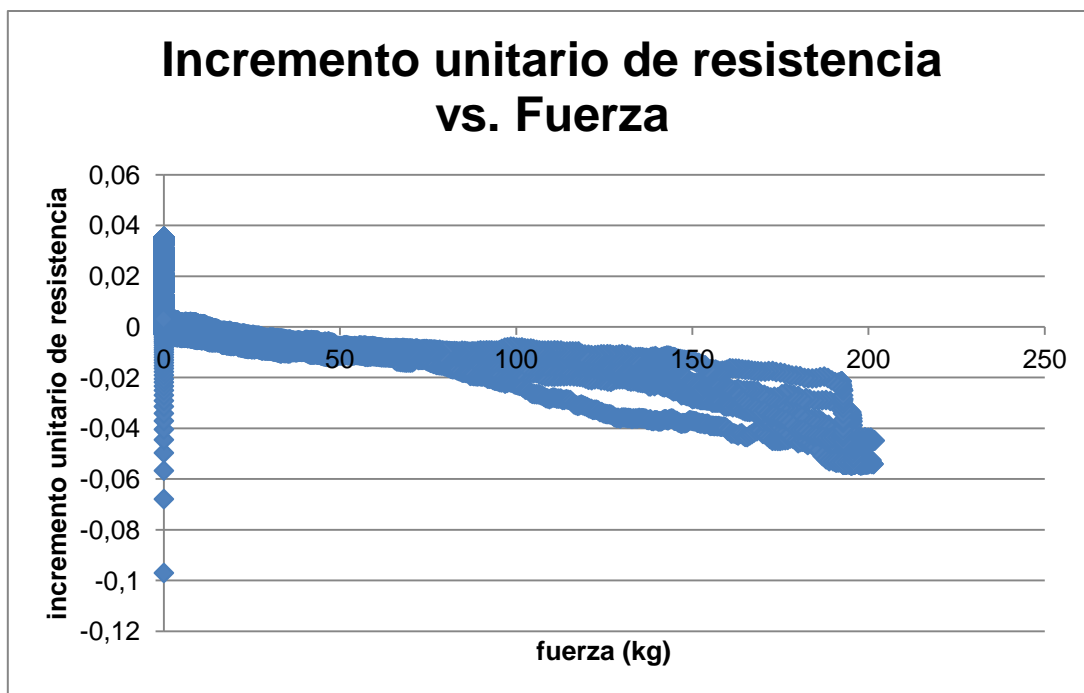
## 9 Sensor 211



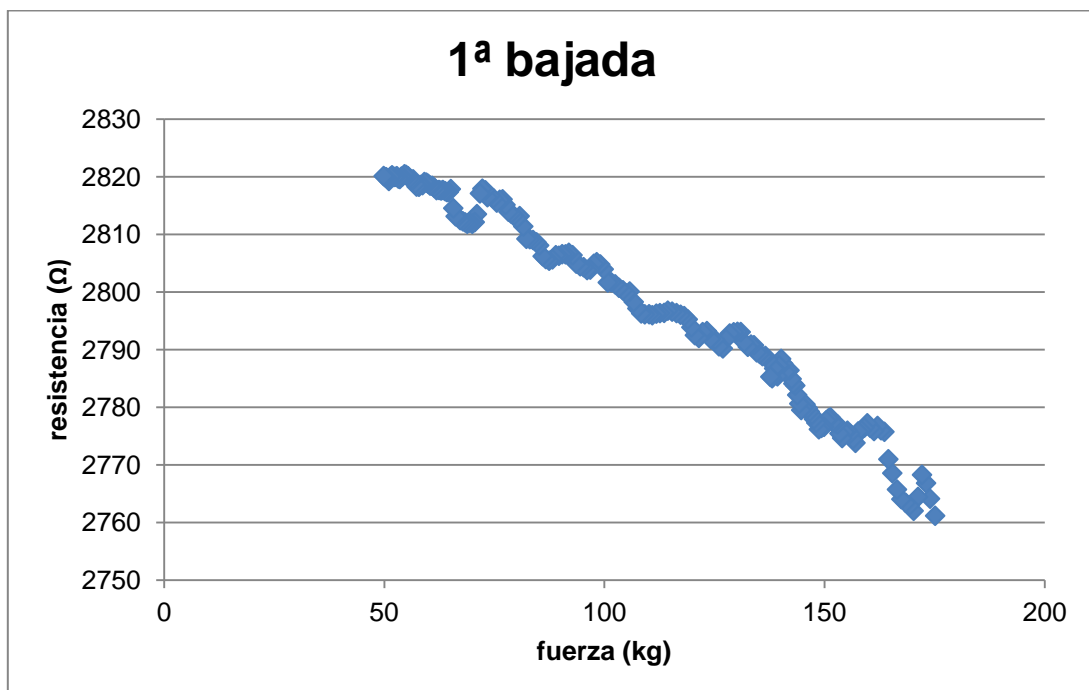
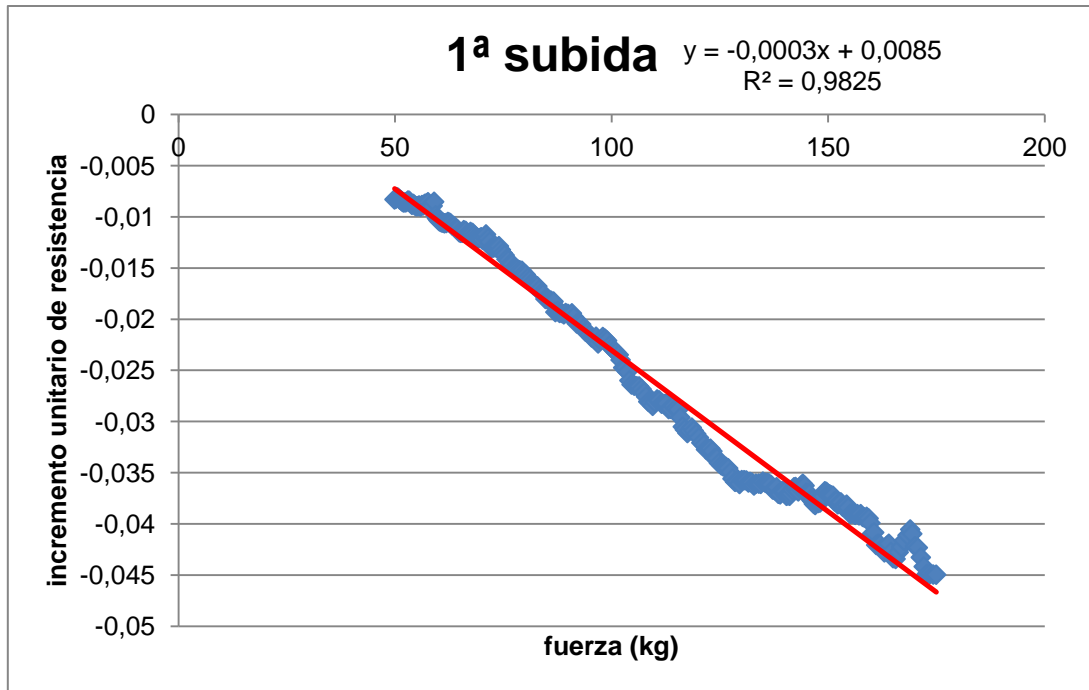
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

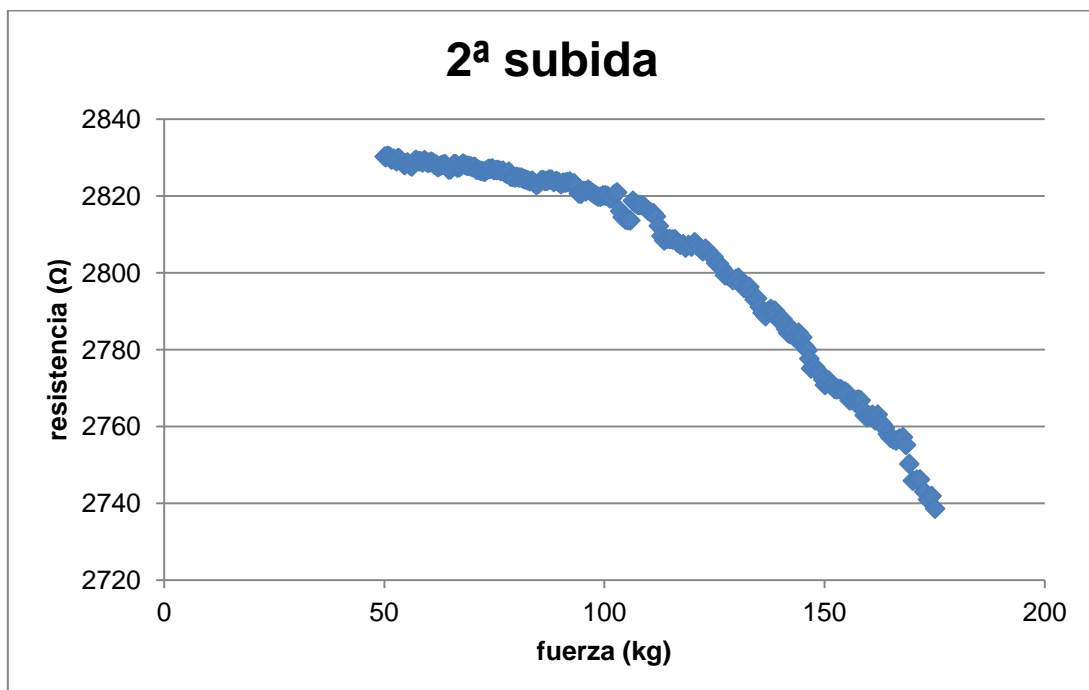
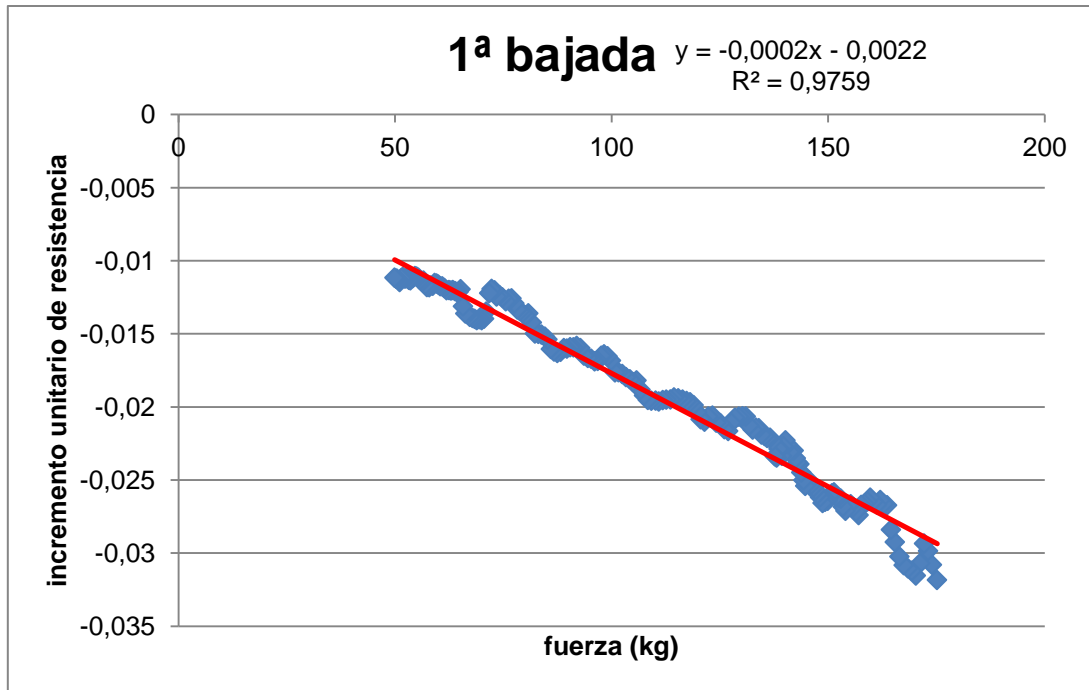


**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**

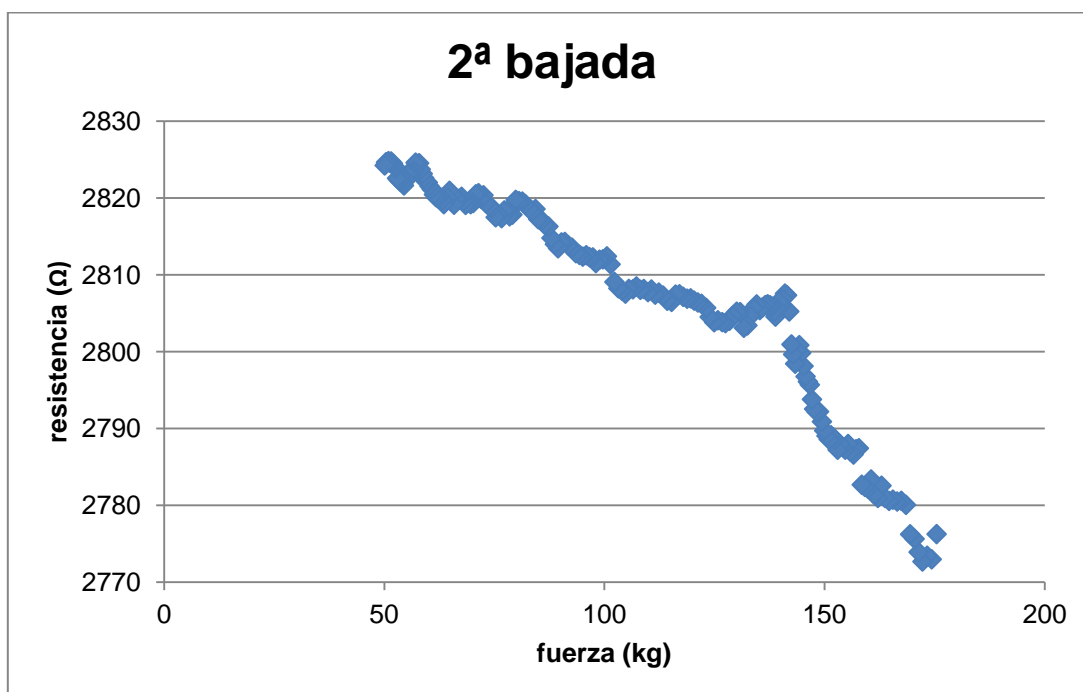
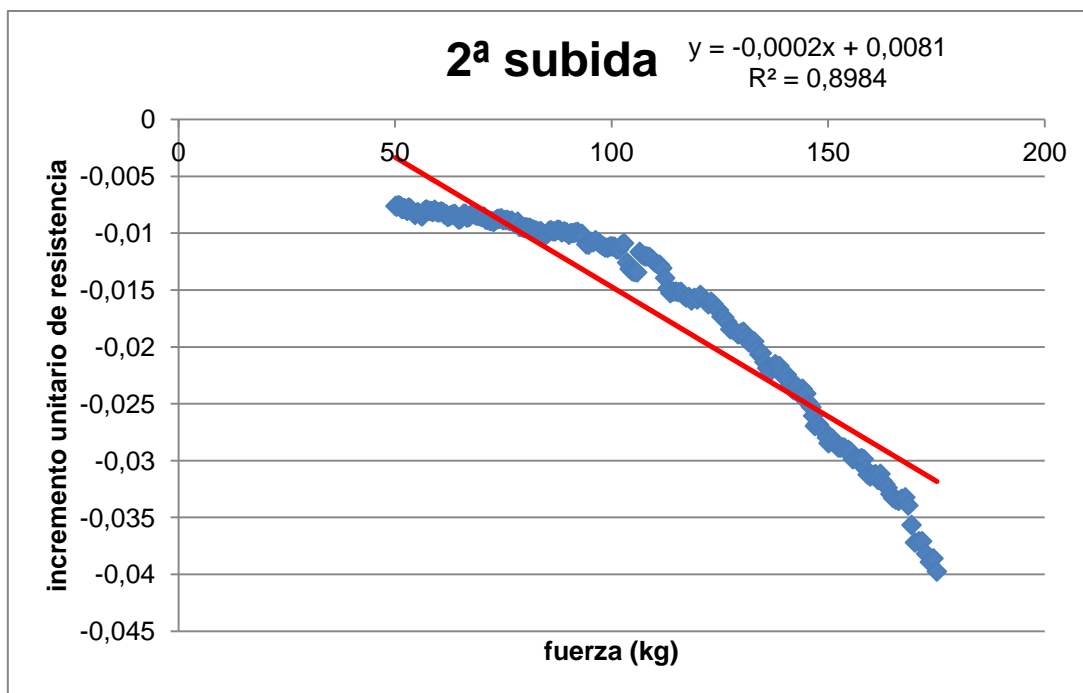




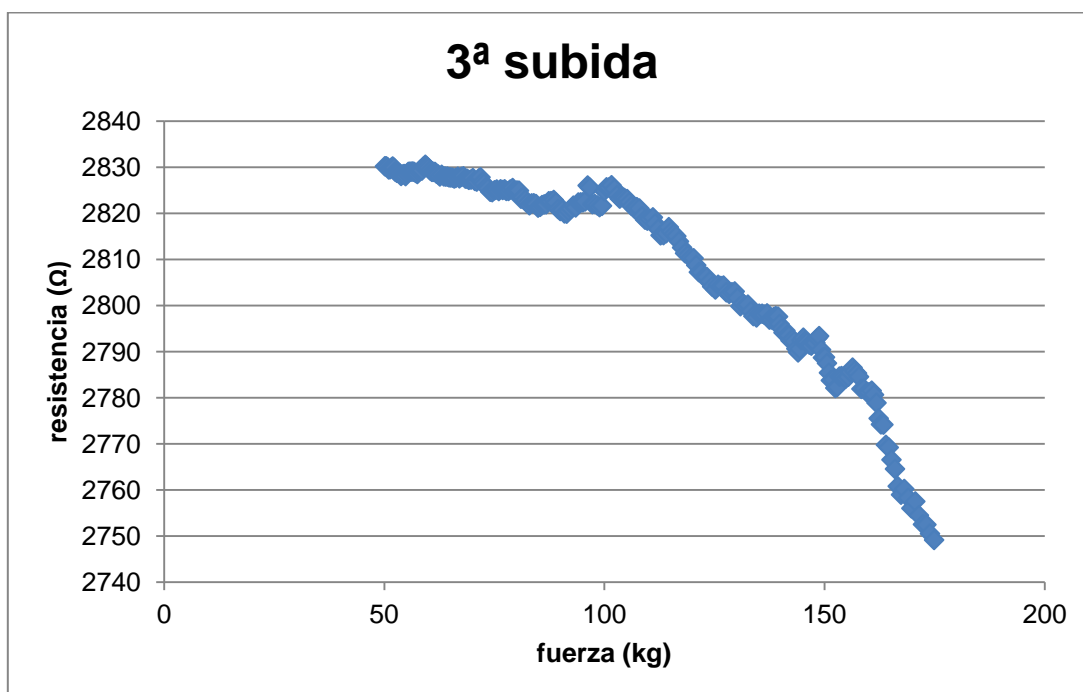
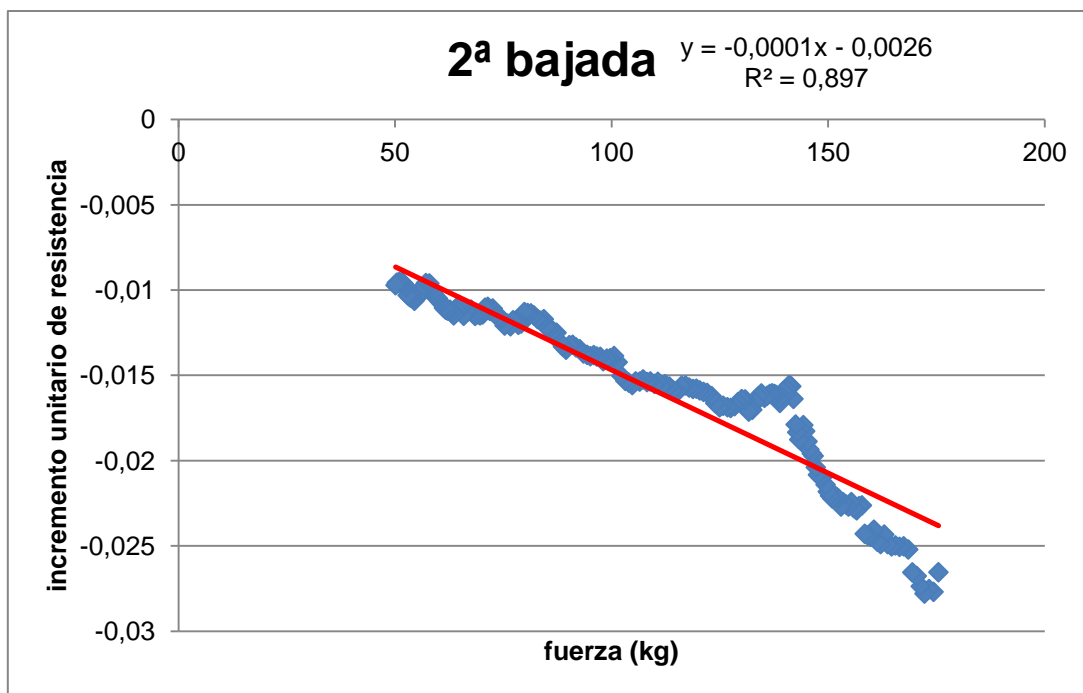
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



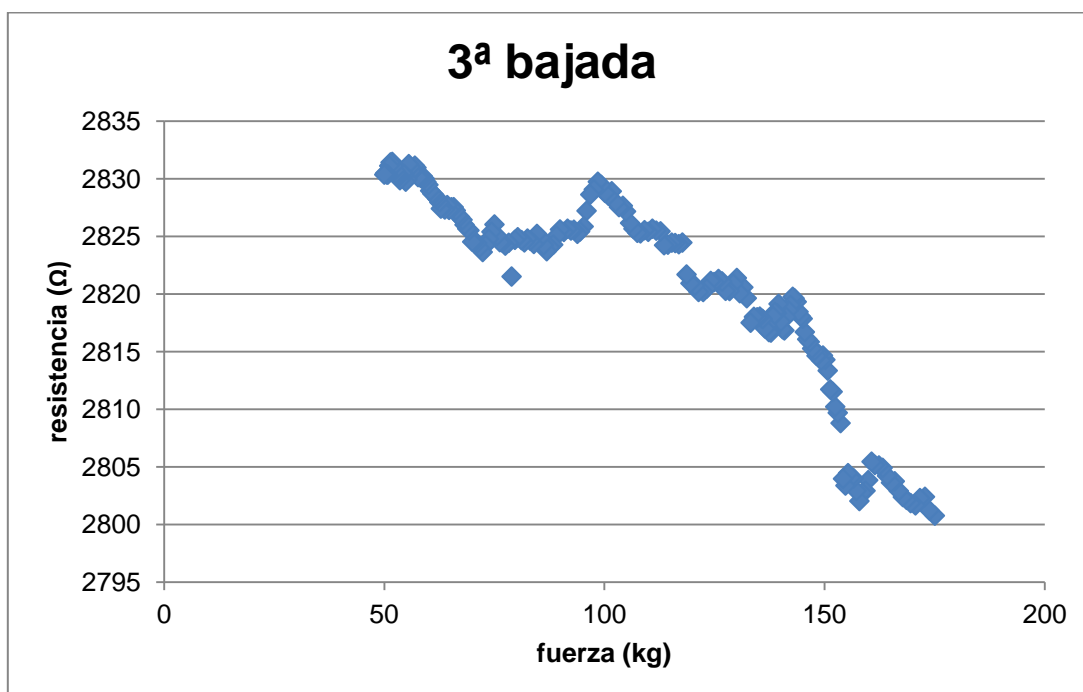
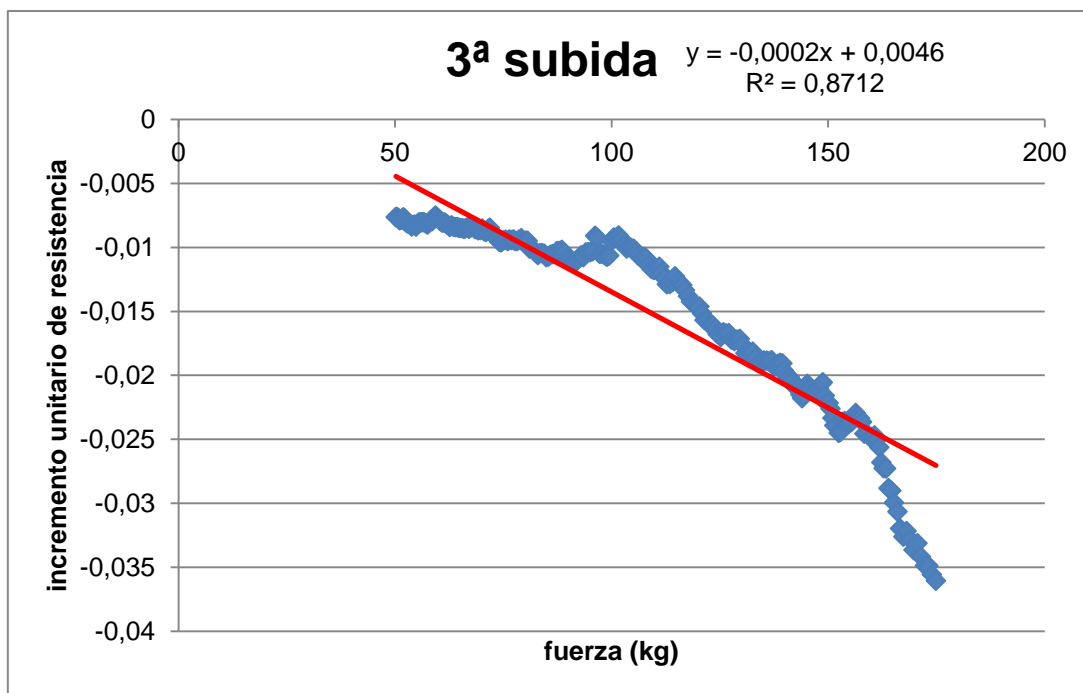
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



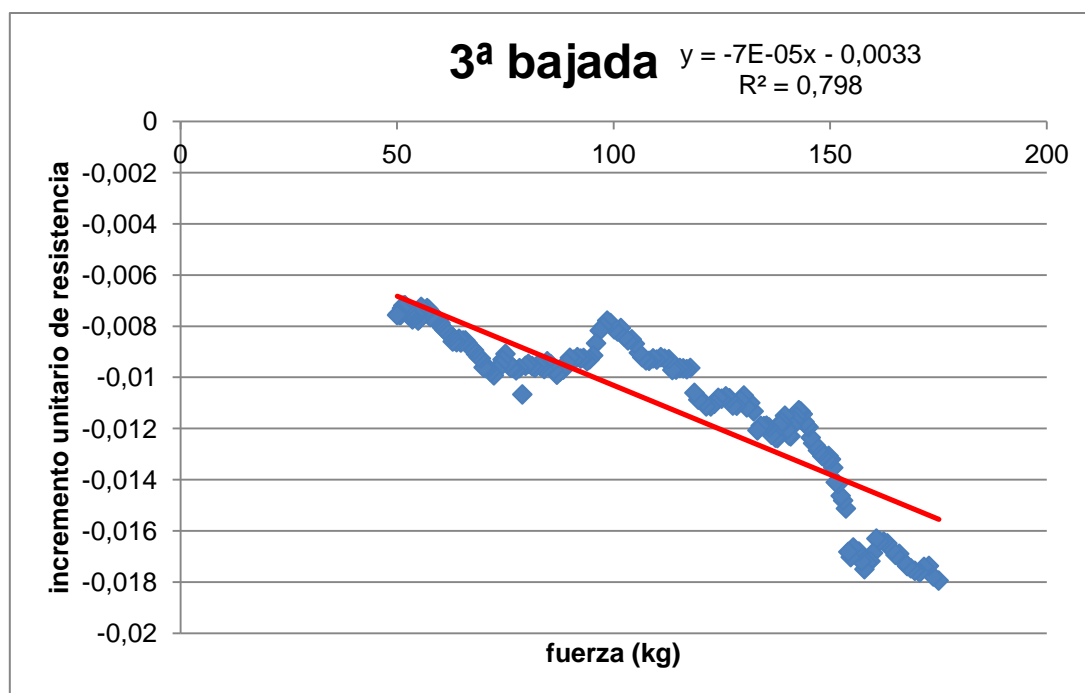
**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**



**Anexo D. Resultados Ensayo Estático con Carga**





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**EPS**

Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Málaga

# TRABAJO FIN DE GRADO

**ANEXO E. Resultados Caracterización de los Sensores según el Tipo de Conexión**

***“Caracterización y fabricación de sensores de cemento con nanotubos de carbono (CNTs)”***

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: JOSÉ LUIS GÓMEZ RODA

Tutor: GERMÁN CASTILLO LÓPEZ

Cotutor: FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ

junio de 2.017



**Anexo E. Resultados Caracterización de los Sensores según el Tipo de Conexión**

**ÍNDICE ANEXO E. Resultados Caracterización de los Sensores según el  
Tipo de Conexión**

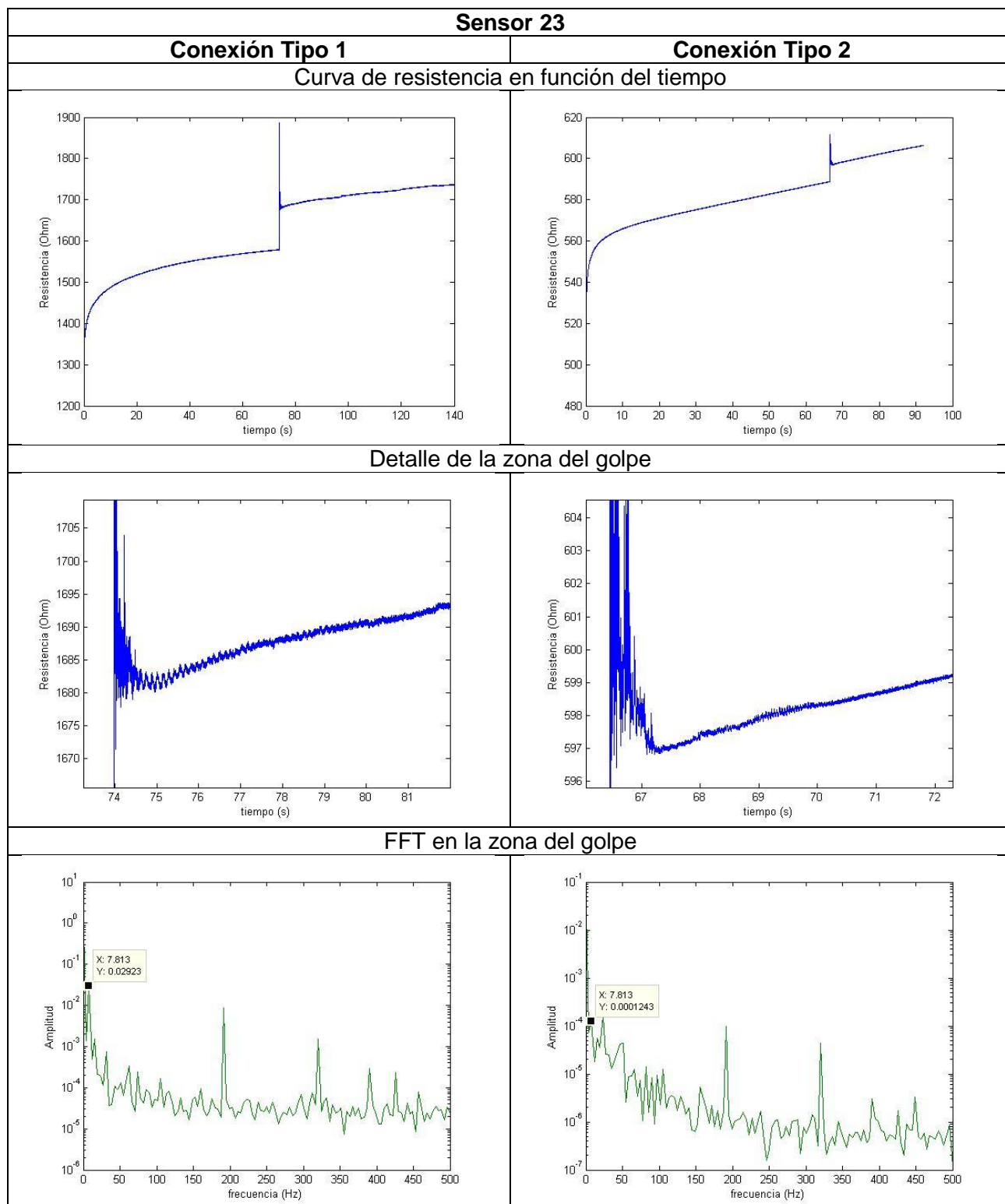
1	SENSOR 23.....	3
2	SENSOR 24.....	4
3	SENSOR 211.....	5
4	SENSOR 33.....	6
5	SENSOR 35.....	7
6	SENSOR 38.....	8
7	SENSOR 43.....	9
8	SENSOR 44.....	10
9	SENSOR 45.....	11
10	SENSOR 47.....	12



**Anexo E. Resultados Caracterización de los Sensores según el Tipo de Conexión**

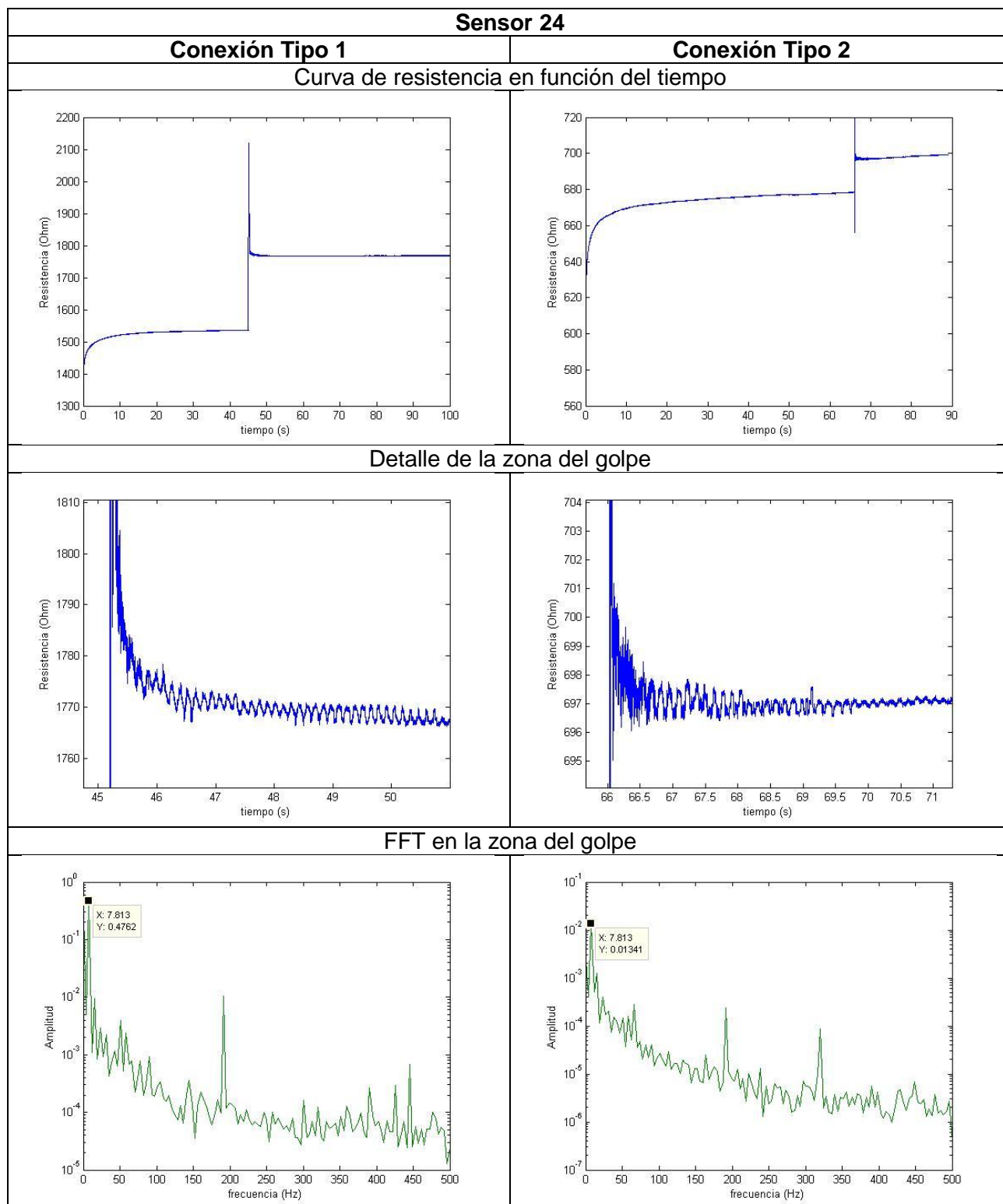
**Anexo E. Resultados Caracterización de los Sensores según el Tipo de Conexión**

**1 Sensor 23**



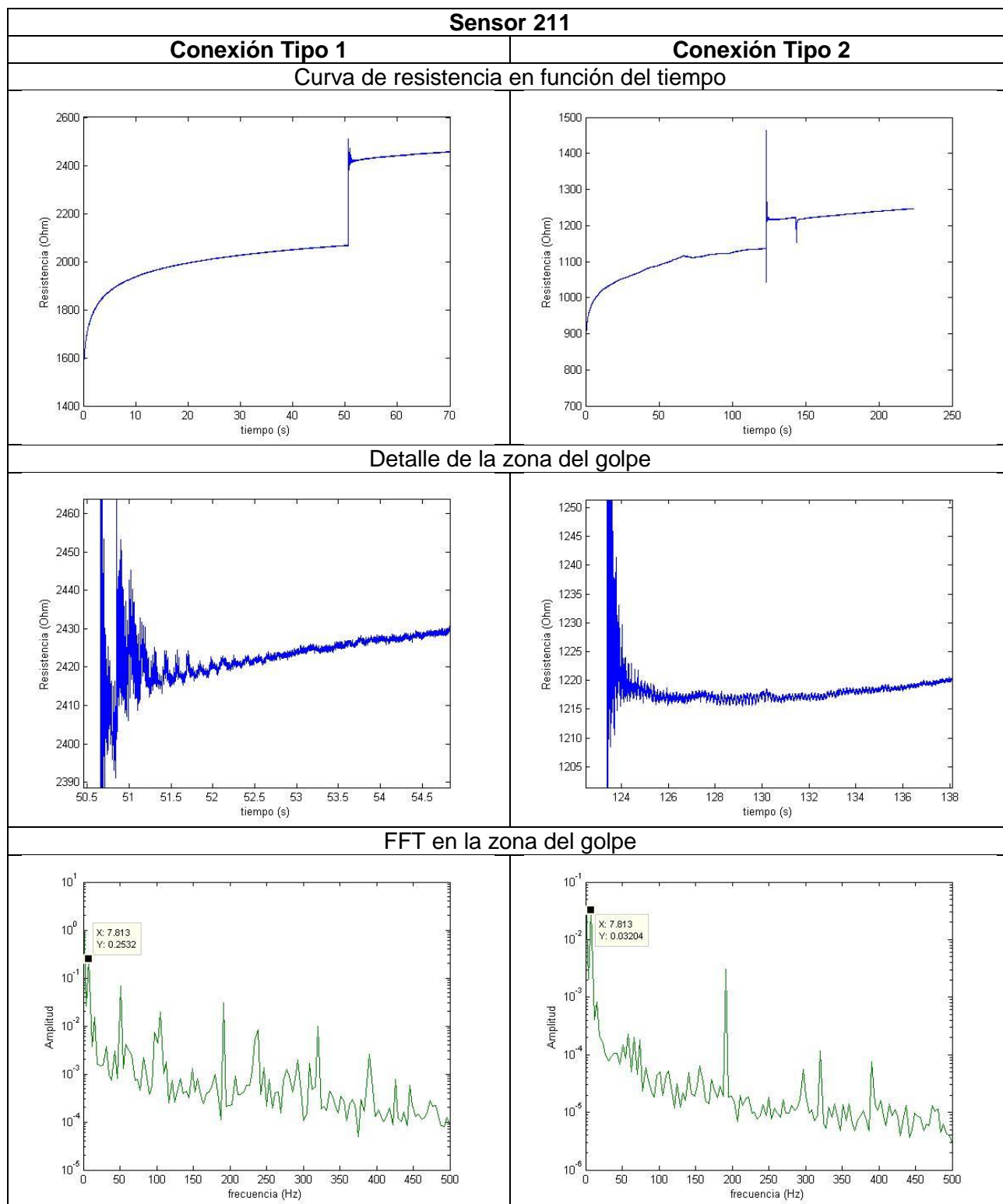
**Anexo E. Resultados Caracterización de los Sensores según el Tipo de Conexión**

**2 Sensor 24**



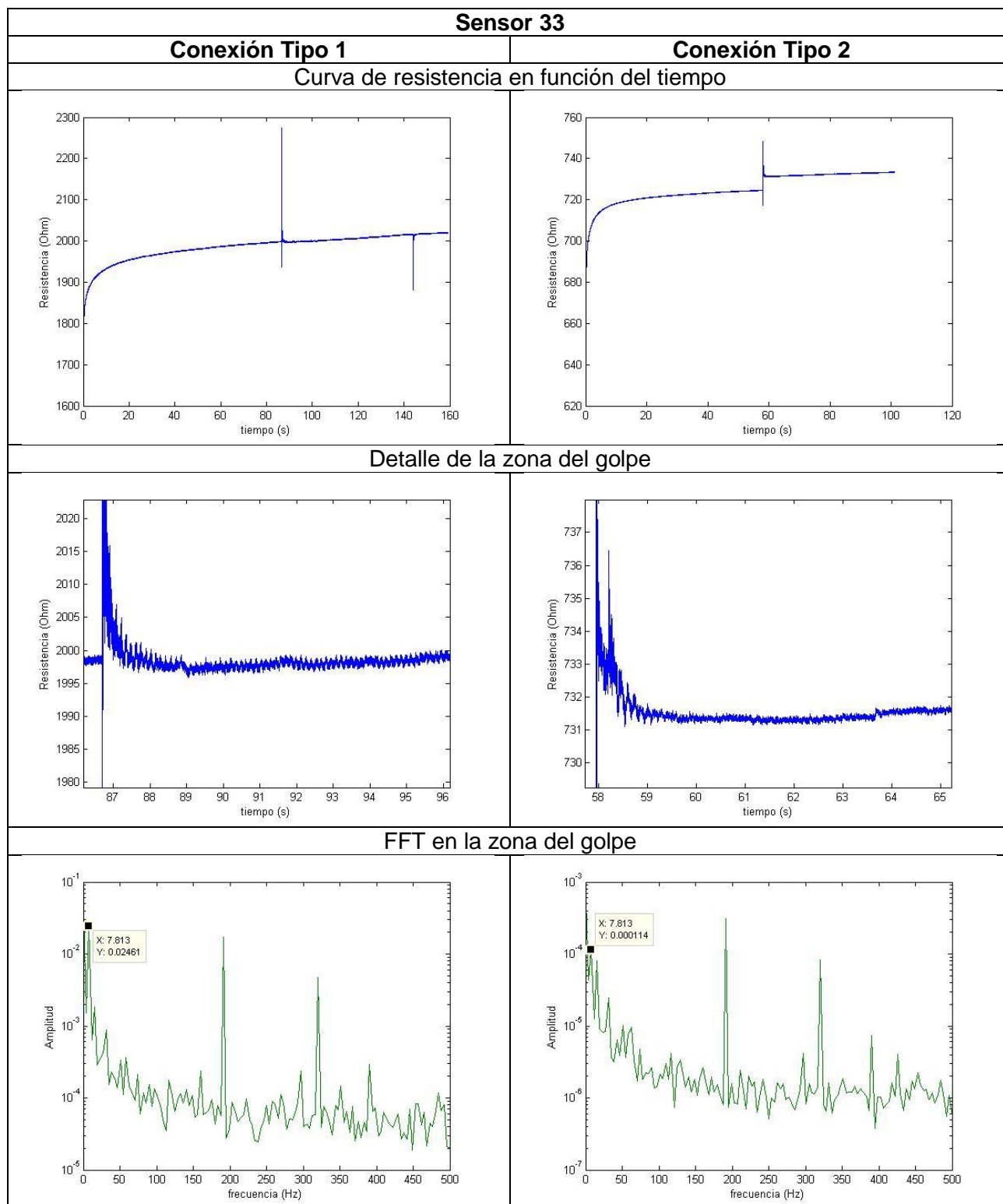
**Anexo E. Resultados Caracterización de los Sensores según el Tipo de Conexión**

**3 Sensor 211**



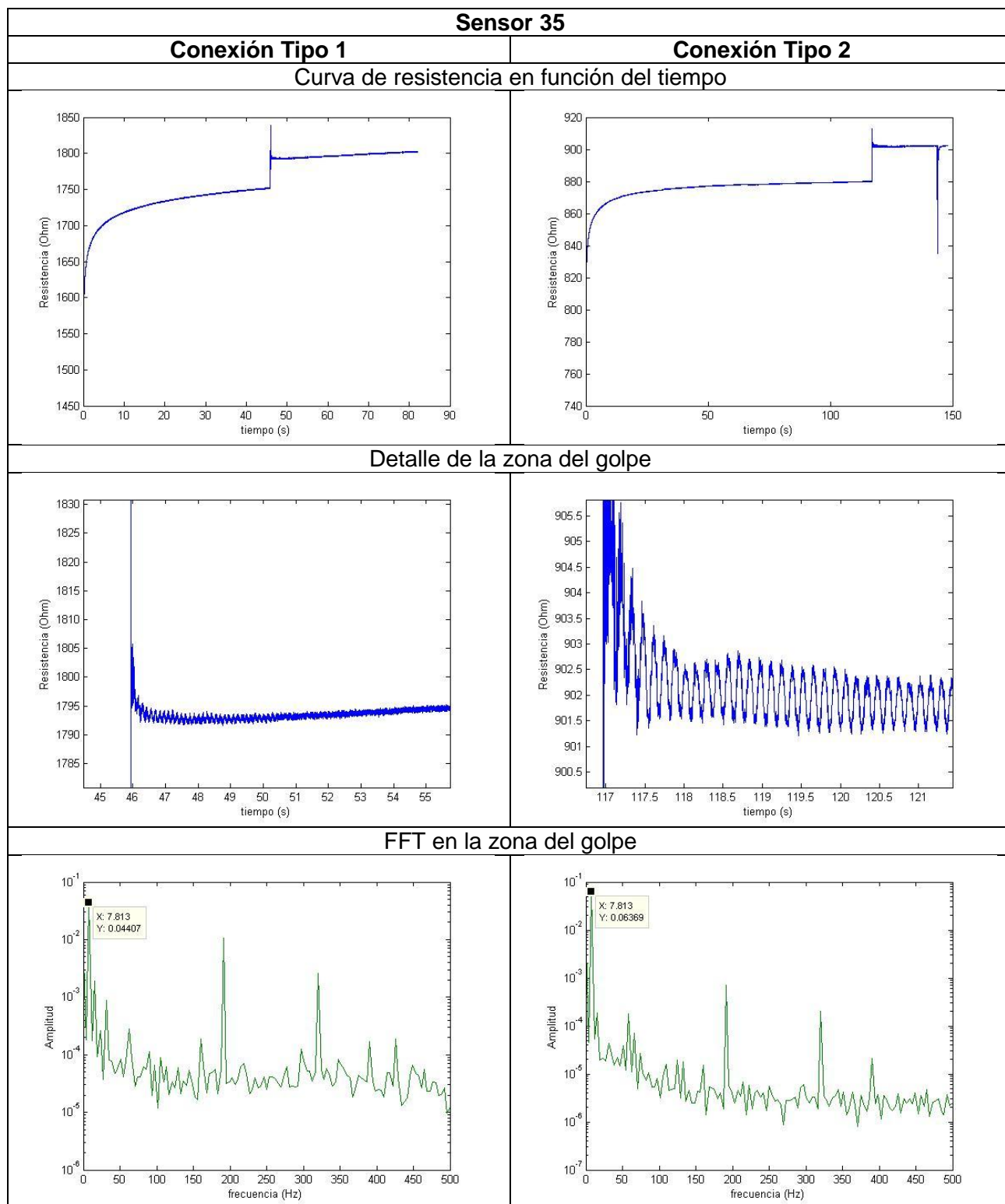
**Anexo E. Resultados Caracterización de los Sensores según el Tipo de Conexión**

**4 Sensor 33**

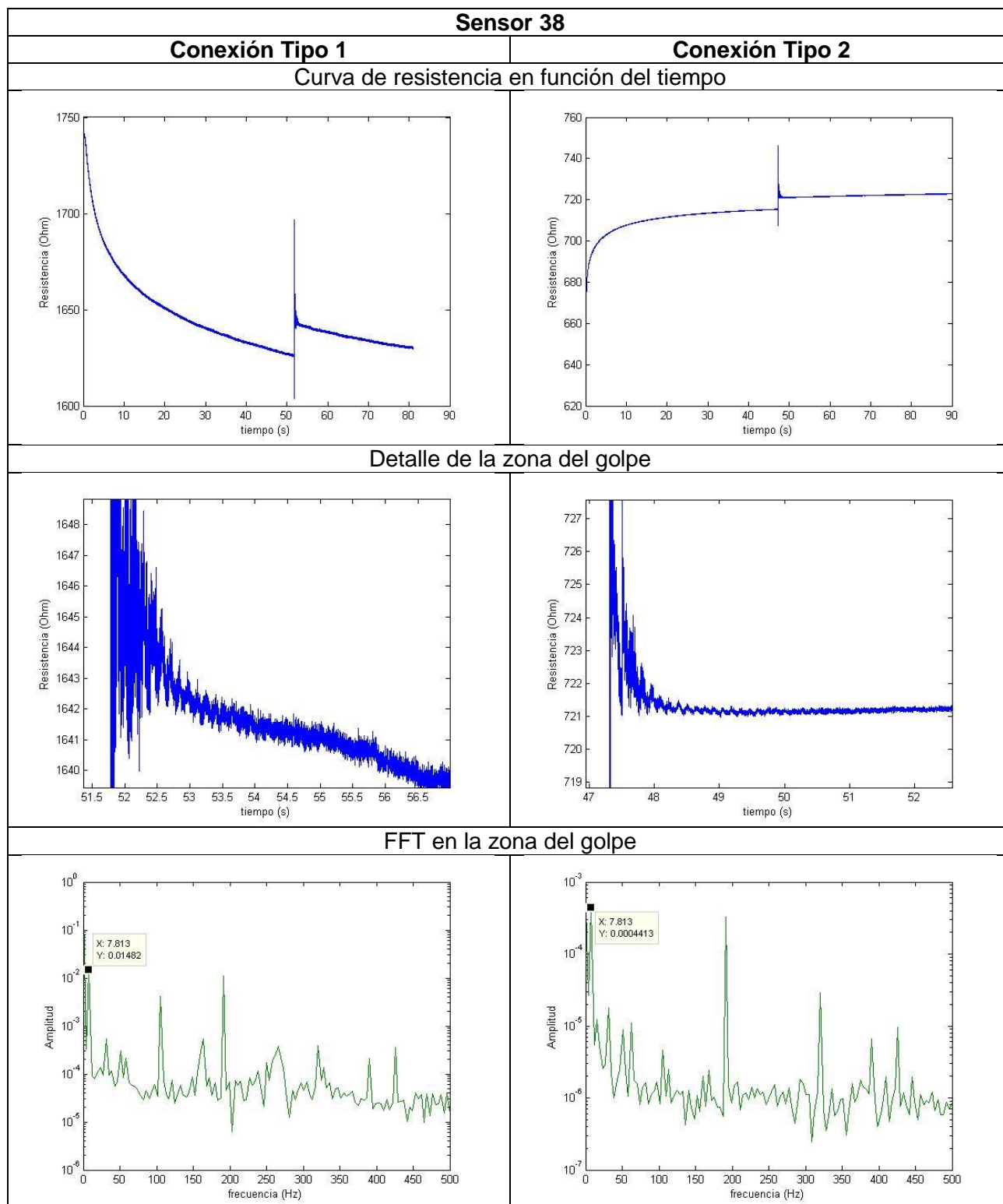


**Anexo E. Resultados Caracterización de los Sensores según el Tipo de Conexión**

**5 Sensor 35**

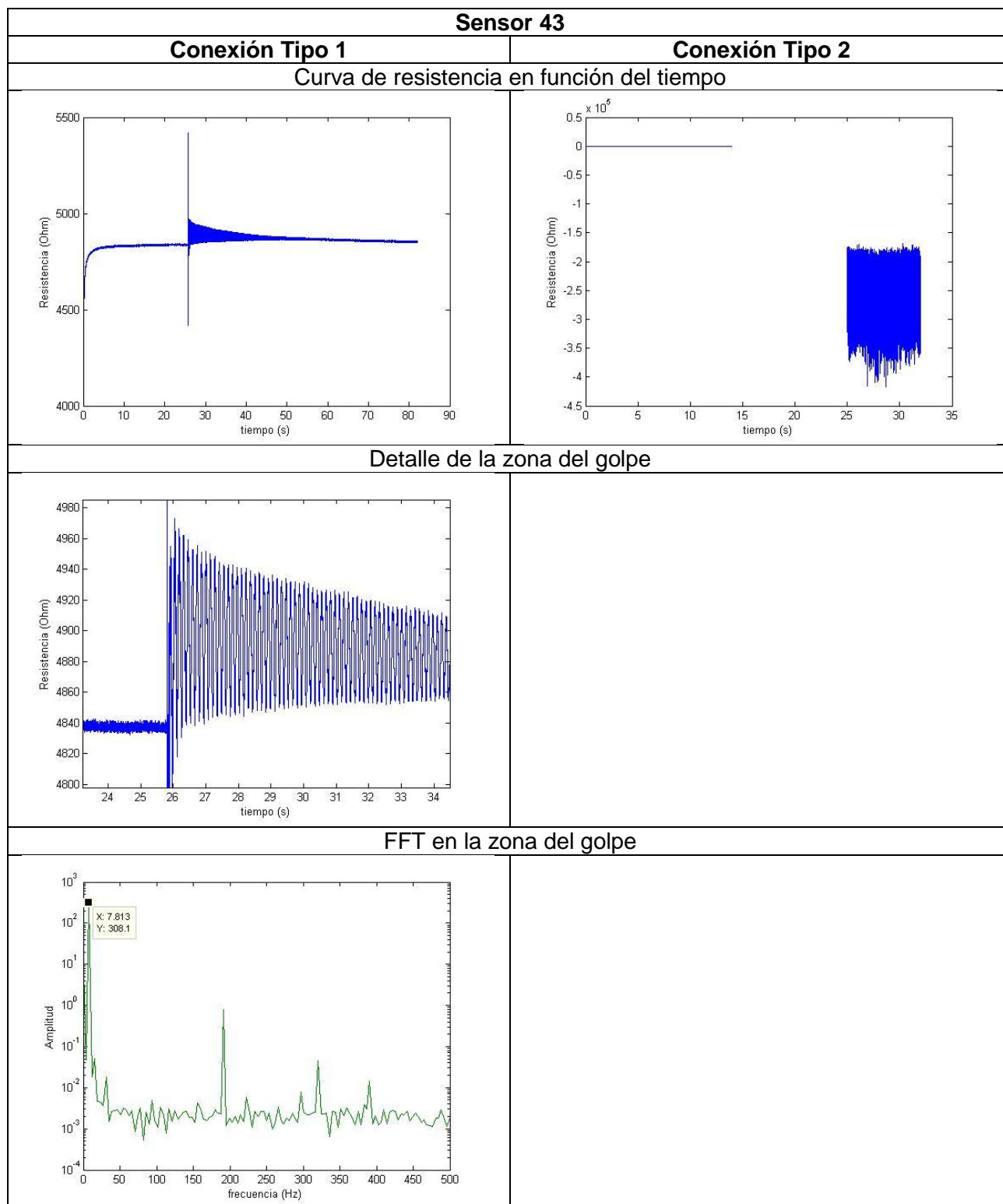


## 6 Sensor 38



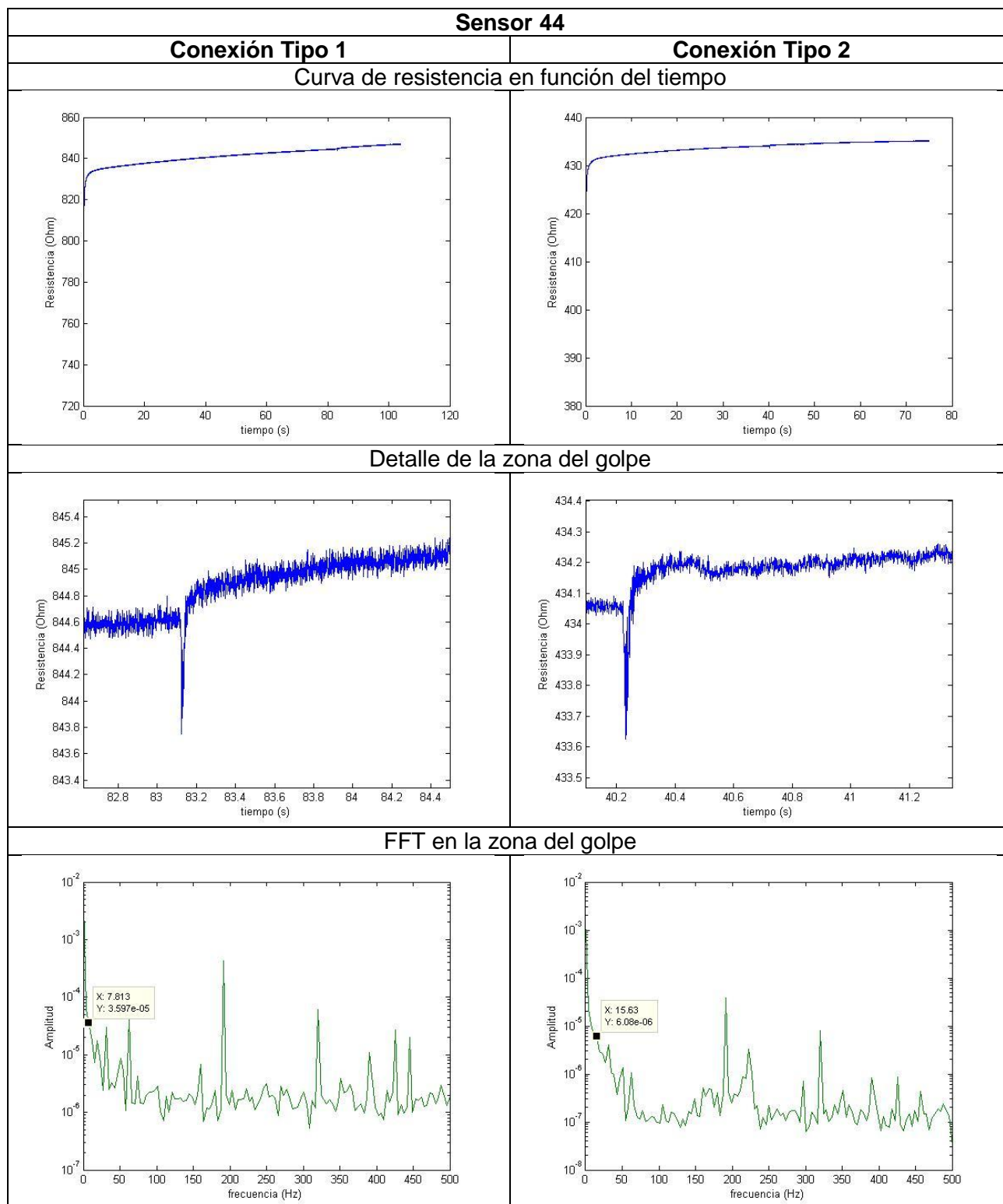
**Anexo E. Resultados Caracterización de los Sensores según el Tipo de Conexión**

**7 Sensor 43**

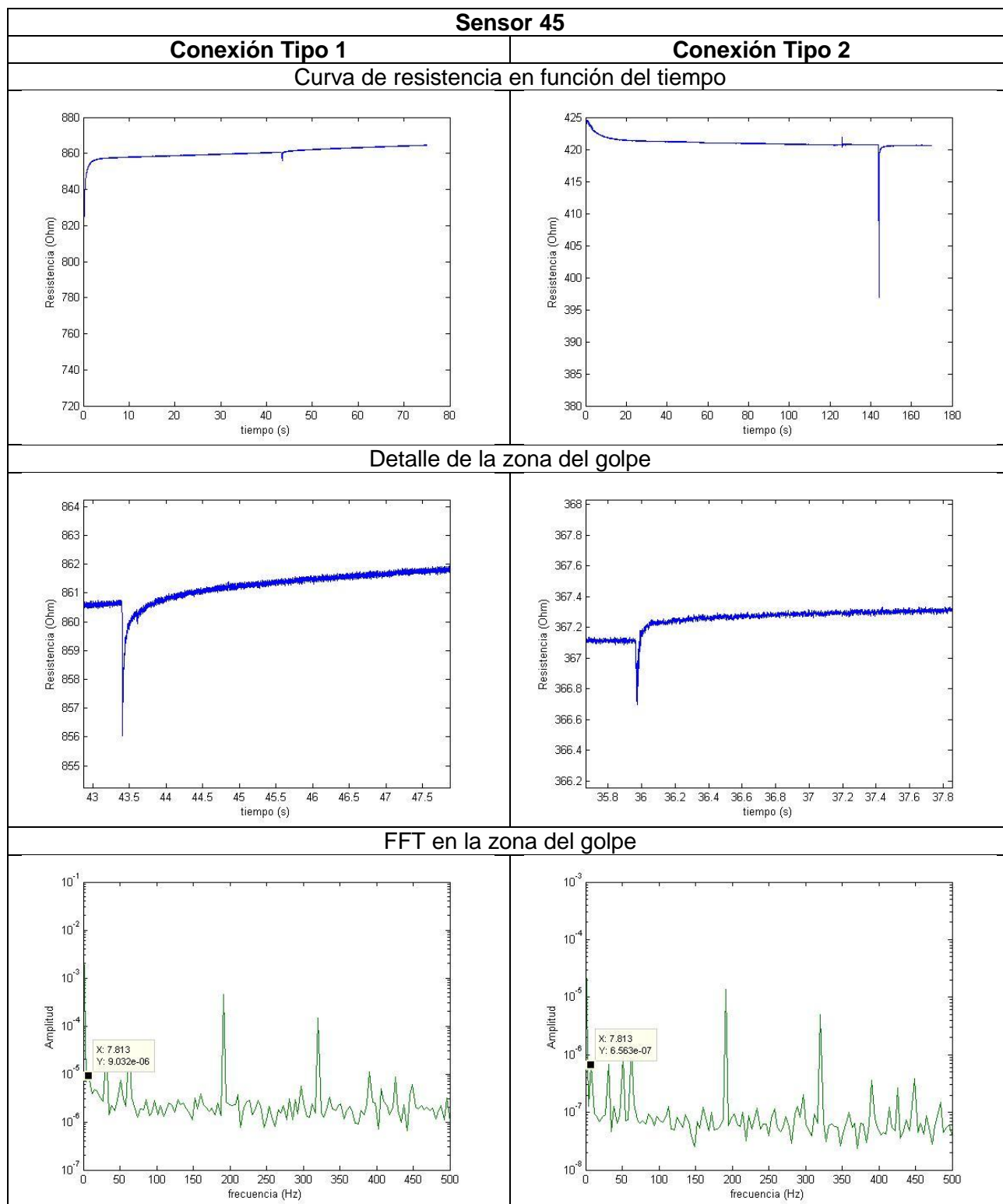




## 8 Sensor 44

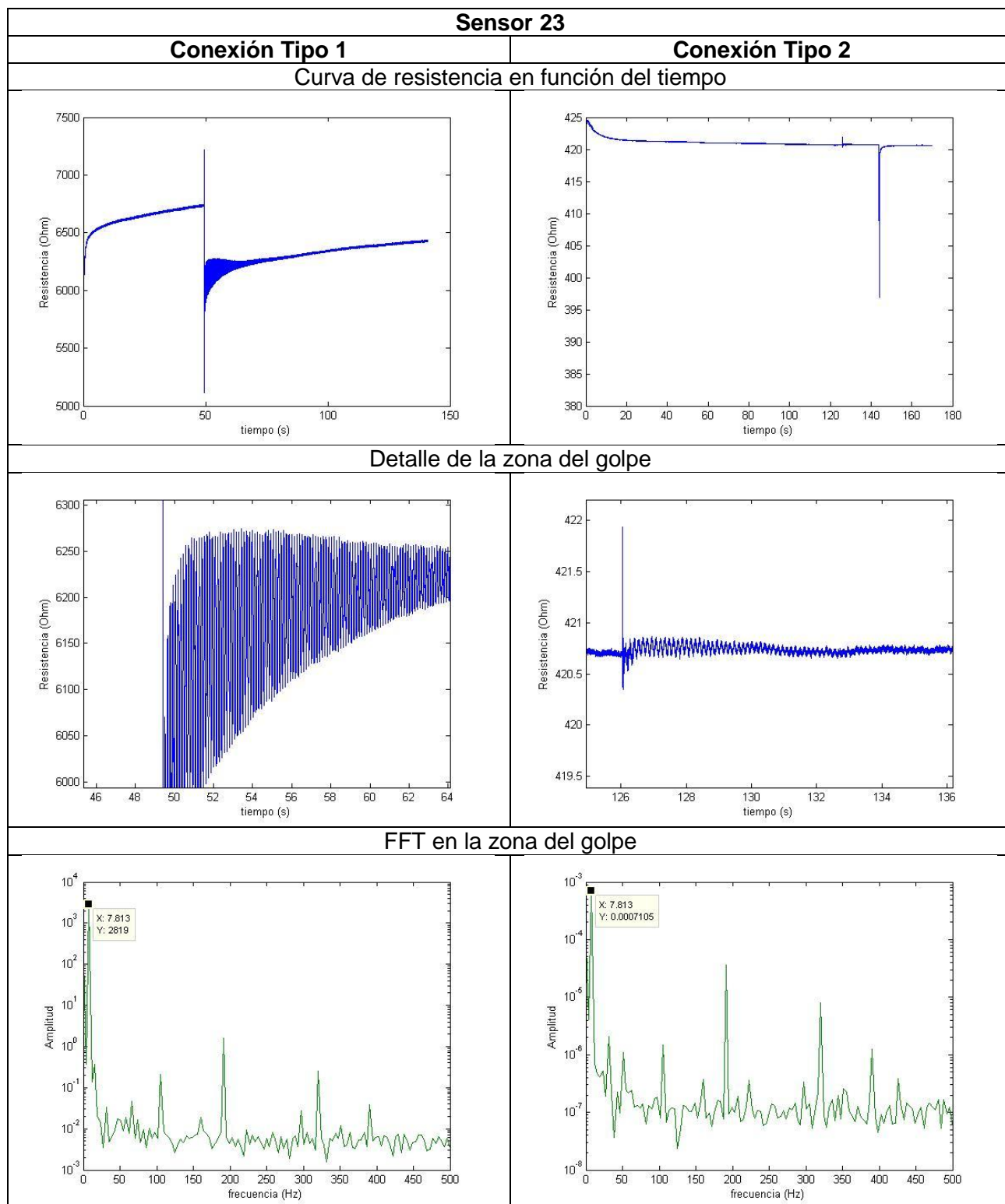


## 9 Sensor 45



**Anexo E. Resultados Caracterización de los Sensores según el Tipo de Conexión**

**10 Sensor 47**





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**EPS**

Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Málaga

# TRABAJO FIN DE GRADO

## **ANEXO F. Fichas Técnicas de Materiales**

***“Caracterización y fabricación de sensores de cemento con nanotubos de carbono (CNTs)”***

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: JOSÉ LUIS GÓMEZ RODA

Tutor: GERMÁN CASTILLO LÓPEZ

Cotutor: FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ

junio de 2.017



**Anexo F. Fichas Técnicas de Materiales**

**ÍNDICE ANEXO F. Fichas Técnicas de Materiales**

- 1 SUPERPLASTIFICANTE**
- 2 PELLETS**
- 3 CEMENTO**

# MasterEase 3850

**Aditivo superplastificante / reductor de agua de alta actividad para la producción de hormigones de baja viscosidad y reología mejorada con un buen mantenimiento de consistencia.**

## CAMPO DE APLICACIÓN

MasterEase 3850 es un aditivo superplastificante / reductor de agua de alta actividad basado en la nueva tecnología de polímeros PAE exclusiva de BASF Construction Chemicals para la producción de hormigones de baja viscosidad incluso con reducidos contenidos de agua. Diseñado para mejorar la reología y con ello su trabajabilidad, bombeabilidad y la puesta en obra del hormigón fabricado.

MasterEase 3850 permite la fabricación de hormigones de elevada fluidez y de alta resistencia, con un buena trabajabilidad y un buen mantenimiento de consistencia.

Consultar con el Departamento Técnico cualquier aplicación no prevista en esta relación.

## PROPIEDADES

- Gran poder reductor de agua.
- Mejora el acabado y la textura de la superficie del hormigón.
- Aumenta las resistencias iniciales y finales del hormigón.
- Buen mantenimiento de consistencia para cubrir los tiempos de transporte, sin retraso de fraguado.
- Facilita el bombeo y reduce el tiempo de aplicación y compactación.
- Dota al hormigón de un excelente comportamiento reológico, con reducida viscosidad y pegajosidad y docilidad mejorada.
- Excelente cohesión.

## DOSIFICACIÓN

Empleado como aditivo único, MasterEase 3850 se dosifica al 0,5 – 2,5 % sobre peso de cemento, en función del tipo de materiales y el tipo de hormigón a fabricar.

Dosificaciones diferentes a las recomendadas son posibles con ensayos previos que justifiquen su buen rendimiento.

Se recomienda en cada caso realizar los ensayos oportunos para determinar la dosificación óptima.

## MODO DE UTILIZACIÓN

MasterEase 3850 se añade al hormigón durante su amasado, con la última parte del agua de amasado. Debe mezclarse un tiempo suficiente para garantizar la completa homogeneización del aditivo en toda la masa.

MasterEase 3850 es compatible con los plastificantes de la gama MasterPozzolith y MasterPolyheed de BASF.

MasterEase 3850 puede ser también añadido directamente al camión hormigonera en obra, para restablecer hormigones que haya perdido consistencia. En este caso, se debe asegurar la plena compatibilidad entre aditivos antes de la aplicación.

No añadir nunca el aditivo antes del agua de amasado, sobre el cemento y los áridos secos.

Consultar con el Departamento Técnico la compatibilidad entre aditivos antes de su utilización.

## PRESENTACIÓN

MasterEase 3850 se a granel en cisterna, contenedores de 1050 kg, bidones de 210 kg y en garrafas de 25 kg.

## LIMPIEZA DE HERRAMIENTAS

La limpieza de equipos y herramientas impregnadas de MasterEase 3850 puede realizarse con agua preferentemente caliente.

## CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO/ TIEMPO DE CONSERVACIÓN

Almacenar en lugar fresco y seco y en sus envases originales herméticamente cerrados, con temperaturas superiores a +5° C.

MasterEase 3850 puede conservarse hasta 12 meses si se conserva adecuadamente.

# MasterEase 3850

**Aditivo superplastificante / reductor de agua de alta actividad para la producción de hormigones de baja viscosidad y reología mejorada con un buen mantenimiento de consistencia.**

## MANIPULACIÓN Y TRANSPORTE

Para su manipulación deberán observarse las medidas preventivas usuales para el manejo de productos químicos por ejemplo usar gafas y guantes. No comer, beber ni fumar durante la aplicación. Lavarse las manos antes de una pausa y al término del trabajo.

La eliminación del producto y su envase debe realizarse de acuerdo con la legislación vigente y es responsabilidad del poseedor final.

Para más información, consultar la Hoja de Seguridad del producto.

## HAY QUE TENER EN CUENTA

- Se recomienda siempre la realización de ensayos previos a la utilización del aditivo.
- No emplear dosificaciones inferiores ni superiores a las recomendadas sin previa consulta con el Departamento Técnico.
- Consulta la compatibilidad entre aditivos

Propiedades	
Función principal:	Superplastificante / Reductor de agua de alta actividad.
Efecto secundario por sobredosificación:	Riesgo de disgregación a dosis elevadas.
Aspecto físico:	Líquido turbio amarillento.
Densidad, 20° C:	1,050 ± 0,02 g/cm <sup>3</sup>
pH, 20° C:	5 ± 1
Viscosidad Brookfield 20° C Sp00/100rpm:	< 35 cps.
Cloruros:	< 0,1%
Los datos técnicos reflejados son fruto de resultados estadísticos y no representan mínimos garantizados. Si se desean los datos de control, pueden solicitarse las "Especificaciones de Venta" a nuestro Departamento Técnico.	



MARCADO CE DE PRODUCTO BAJO LA  
DIRECTIVA UE DE PRODUCTOS DE LA  
CONSTRUCCIÓN DE LA UNIÓN EUROPEA



# MasterEase 3850

**Aditivo superplastificante / reductor de agua de alta actividad para la producción de hormigones de baja viscosidad y reología mejorada con un buen mantenimiento de consistencia.**

## NOTA:

La presente ficha técnica sirve, al igual que todas las demás recomendaciones e información técnica, únicamente para la descripción de las características del producto, forma de empleo y sus aplicaciones. Los datos e informaciones reproducidos, se basan en nuestros conocimientos técnicos obtenidos en la bibliografía, en ensayos de laboratorio y en la práctica.

Los datos sobre consumo y dosificación que figuran en esta ficha técnica, se basan en nuestra propia experiencia, por lo que estos son susceptibles de variaciones debido a las diferentes condiciones de las obras. Los consumos y dosificaciones reales, deberán determinarse en la obra, mediante ensayos previos y son responsabilidad del cliente.

Para un asesoramiento adicional, nuestro Servicio Técnico, está a su disposición.

BASF Construction Chemicals España, S.L. se reserva el derecho de modificar la composición de los productos, siempre y cuando éstos continúen cumpliendo las características descritas en la ficha técnica.

Otras aplicaciones del producto que no se ajusten a las indicadas, no serán de nuestra responsabilidad.

Otorgamos garantía en caso de defectos en la calidad de fabricación de nuestros productos, quedando excluidas las reclamaciones adicionales, siendo de nuestra responsabilidad tan solo la de reingresar el valor de la mercancía suministrada.

Debe tenerse en cuenta las eventuales reservas correspondientes a patentes o derechos de terceros.

**Edición: 22/02/2016**

La presente ficha técnica pierde su validez con la aparición de una nueva edición

## CONTACTO

**BASF Construction Chemicals España, S.L.**

Carretera del Mig, 219

08907 L'Hospitalet de Llobregat

Barcelona

Tel: 93 261 61 00

Fax: 93 261 62 19

Basf-cc@basf-cc.es

[www.master-builders-solutions.basf.es](http://www.master-builders-solutions.basf.es)

# GRAPHISTRENGTH® CW2-45

## WATER SOLUBLE MWCNT CONCENTRATE TECHNICAL DATA SHEET

### Description

Graphistrength® CW2-45 is a masterbatch that contains multi-wall carbon nanotubes (MWCNT) at high concentration of 45 % by weight, perfectly dispersed in Carboxyl Methyl Cellulose (CMC).

Graphistrength® CW2-45 is designed for the production of electrically conductive water-based formulations.

Graphistrength® CW2-45 is provided in the form of pellets with the following key characteristics:

Property	Unit	Typical value <sup>(1)</sup>
Aspect		Black Pellets
MWCNT (2) content	wt %	45
CMC content	wt %	55

(1) Data not intended for specification purposes

(2) Graphistrength® MWCNT with purity > 90 %

### Benefits and applications

Graphistrength® CW2-45 can be diluted in various water-based formulations. Typical final MWCNT loadings in the final formulations are in the range of 1 to 3 wt% (2 to 6wt% of CW2-45 concentrate) depending on the formulation characteristics, targeted performances, processing methods and conditions. Typical electrical resistivity that can be achieved is in the range of  $10 - 10^8$  Ohm.cm. The ESD properties obtained with Graphistrength® CW2-45 are outstandingly consistent and uniform.

Graphistrength® CW2-45 is particularly interesting for its formulation flexibility thanks to the high concentration in MWCNT.

### Dispersion guide

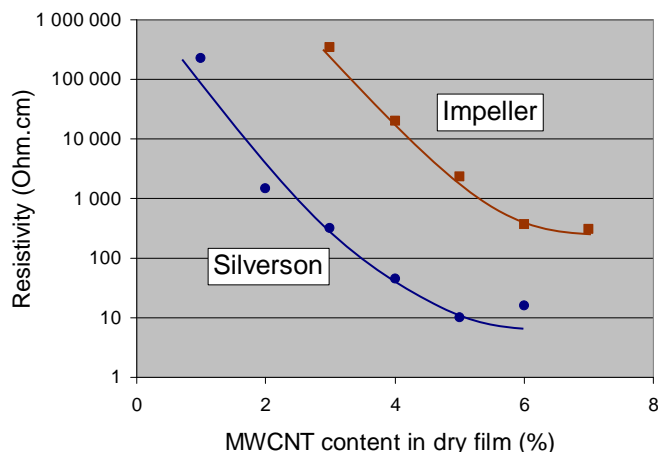
For optimal dispersion, the CW2-45 pellets should be added progressively in water under a certain agitation (1000-1500 rpm). After a few minutes, this dispersion is homogeneous but contains some aggregates. The dispersion can be optimized by high shear mixing. A detailed procedure is indicated below:

#### *Dispersion of CW2-45 step by step:*

1. Immerse CW2-45 pellets in hot water (70 – 90°C) during at least 15 min or in water at ambient temperature during at least 2 hours under a certain agitation (1000-1500 rpm), for example with a dissolver disc tool.
2. Apply high-shear mixing to the suspension for at least 30 min (for instance for 500-1000ml solution). A dissolver disc (peripheral speed between 15 and 20 m/s) or a rotor-stator mixer (e.g. Silverson L4RT at 6,000 rpm or higher) can be used. Viscosifiers can be added prior to high shear mixing to increase viscosity and thus shear. This will result in better dispersion qualities or reduced dispersing times.
3. High shear mixing will result in water evaporation. We suggest, to limit the water evaporation to put the flask in an iced batch, if possible put a top on the flask. Therefore, it is recommended to monitor and adjust the amount of water after the dispersion step if necessary.
4. Note that a minimal amount of water is required to achieve efficient solvation of MWCNT. Hence, low MWCNT concentrations (typically < 1wt%) will be more stable than higher MWCNT concentrations. Formulations containing more than 2 wt% of MWCNT will show some settling after a few hours.
5. Add the remaining components of the formulation, e.g. binder, filler, latex...: final dispersion will more or less stable during storage: more stable with high concentration of MWCNT like 4% and more. Versus the final % of MWCNT in the dispersion, we recommend a minimum duration of storage (maximum of one month) and apply a certain agitation with dissolver disk tool if storage of the dispersion during a certain time before use.

## Example of formulation and performance

- System: Water-based acrylic copolymer latex (formulation for paints with solid content of 44 wt%)
- Formulation: 3 g of Graphistrength® CW2-45 are immersed in 55 g of hot water for dispersion. Then at room temperature, 48 g of latex is added. The resulting paint is dried at room temperature.
- Electrical performance: 18 Ohm.cm  
(Silverston process; 1.3 wt% MWCNT in liquid formulation; 6 wt% in dried paint)
- Examples of percolation curves are shown below. Formulations were obtained from dispersions made with either impeller (500 rpm, 30 min) or Silverston (7,000 rpm, 30 min).
- Quality of the dispersion can be controlled with North Bar tool



## Safety and Handling

Graphistrength® CW2-45 must be handled according to the Safety Data Sheet recommendations. Personal protection equipment includes: Dust mask FFP3, gloves, safety glasses and protective suit.

Graphistrength® CW2-45 is provided in dried pellet form.

Graphistrength® CW2-45 is provided in plastic drums of 5 kg and carton drum with PE bag of 25 kg net.

Graphistrength® CW2-45 should be stored in dry place, preferably in its sealed original container, at temperatures between 0 and 45°C. In these storage conditions, shelf life is more than one year.

Dispersion produced with this master-batch has to be stored in plastic drum.

Consult the product's safety data sheet for additional information on properties, hazards and handling.

## Contacts:

- [www.graphistrength.com](http://www.graphistrength.com)

- **Europe**

Arkema France –

Tel.: + 33 (0)5 59 92 66 07

- **Japan/Korea**

Arkema K.K. –

Tel.: + 81 (0)75 326 7515

- **North America**

Arkema Inc. –

Tel.: + 1 610 878 6992

- **Greater China**

Arkema Shanghai –

Tel.: + 86 021 61476888 ext 221

The information contained in this document is based on trials carried out by our Research Centers and data selected from the literature, but shall in no event be held to constitute or imply any warranty, undertaking, expressed or implied commitment from our part. Our formal specifications define the limit of our commitment. No liability whatsoever can be accepted by Arkema with regard to the handling, processing, or use of the product or products concerned - which must in all cases be employed in accordance with all relevant laws and/or regulations in force in the country or countries concerned.

The statements, technical information, and recommendations contained herein are believed to be accurate as of the date hereof. Since the conditions and methods of use of the product and of the information referred to herein are beyond our control, ARKEMA expressly disclaims any and all liability as to any results obtained or arising from any use of the product or reliance on such information; NO WARRANTY OF FITNESS FOR ANY PARTICULAR PURPOSE, WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR ANY OTHER WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, IS MADE CONCERNING THE GOODS DESCRIBED OR THE INFORMATION PROVIDED HEREIN. The information provided herein relates only to the specific product designated and may not be applicable when such product is used in combination with other materials, or in any process. The user should thoroughly test any application before commercialization. Nothing contained herein constitutes a license to practice under any patent and it should not be construed as an inducement to infringe any patent and the user is advised to take appropriate steps to be sure that any proposed use of the product will not result in patent infringement. See MSDS for Health & Safety Considerations.

# Ficha técnica

## i.pro ULTRA 42,5 R/SR

### CEM I 42,5 R-SR 5

#### Descripción

**i.pro ULTRA 42,5 R/SR** es un cemento portland, de alta resistencia química a los sulfatos, resistencias mecánicas iniciales y finales altas y con endurecimiento rápido. Según la norma UNE EN 197-1, es el cemento común denominado CEM I 42,5 R-SR 5.

#### Aplicaciones

El cemento **i.pro ULTRA 42,5 R/SR** está especialmente recomendado para las siguientes aplicaciones:

- Medios con agresividad química moderada o alta:
  - Sulfatos, yesos, cloruros, ácidos y materia orgánica.
  - Agua de mar o ambientes marinos.
  - Aguas puras, carbónicas, residuales e industriales.
- Prefabricados de altas resistencias mecánicas con o sin tratamiento higrotérmico.
- Hormigones armados y pretensados de altas resistencias mecánicas.
- Hormigonado en tiempo frío.
- Hormigones fabricados en central y en obra.
- Hormigón proyectado.
- Hormigones que se deban desencofrar o descimbrar a edades tempranas.

#### Prestaciones

Características esenciales	Cumplimiento de la prestación	Especificaciones técnicas armonizadas
Cementos comunes: componentes y composición	CEM I-SR 5	EN 197-1:2011
Resistencia a compresión (inicial y nominal)	42,5 R	
Tiempo de fraguado	Cumple	
Residuo insoluble	Cumple	
Pérdida por calcinación	Cumple	
Estabilidad de volumen: Expansión	Cumple	
Contenido de SO <sub>3</sub>	Cumple	
Contenido en Cl <sup>-</sup>	Cumple	
Contenido de C3A en el Clinker	Cumple	



## Ventajas

- El bajo contenido en C3A de **i.pro ULTRA 42,5 R/SR** permite una alta resistencia química a los sulfatos, por lo que puede ser utilizado en ambientes de agresividad química.
- El progresivo desarrollo de las resistencias iniciales de **i.pro ULTRA 42,5 R/SR** lo hacen apto para aquellos trabajos que requieran una rápida puesta en obra.
- **i.pro ULTRA 42,5 R/SR** permite un buen rendimiento en plantas de prefabricados al poder desmoldar las piezas a edades más tempranas.
- El progresivo desarrollo de las resistencias de **i.pro ULTRA 42,5 R/SR** permite el hormigonado en condiciones climatológicas adversas (tiempo frío).

## Puesta en obra

Durante la puesta en obra de **i.pro ULTRA 42,5 R/SR** se deben considerar los siguientes aspectos:

- Curar adecuadamente el hormigón.
- En tiempo caluroso, proteger la superficie del hormigón del viento y del sol evitando la desecación. Si la temperatura es superior a 40Cº, suspender el hormigonado o enfriar el agua de amasado y/o los áridos.
- Es responsabilidad del usuario el verificar la idoneidad de uso de los distintos aditivos de hormigón.
- Evitar tiempos de transporte y/o puesta en obra elevados.

## No recomendable para

- Grandes masas de hormigón.
- Hormigonado en tiempo caluroso o con tiempos de transporte y/o puesta en obra elevados.

## Envase y almacenamiento

**i.pro ULTRA 42,5 R/SR** se produce en la fábrica de Málaga y se suministra a tanto a granel, como en sacos de 25 kg. Los sacos se encuentran apilados sobre palés con 64 sacos (1600 kg) y protegidos con lámina retráctil. Almacenar en sitio fresco y seco.

**Sólo para uso profesional. Se recomienda al usuario realizar pruebas y evaluaciones con el fin de definir la idoneidad del producto para el uso previsto.**

Si desea más información, no dude en contactarnos en el **902 35 65 95** o consultar nuestra página web **[www.i-nova.net](http://www.i-nova.net)**.





UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**EPS**

Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Málaga

# TRABAJO FIN DE GRADO

## **ANEXO G. Equipos utilizados**

***“Caracterización y fabricación de sensores de cemento con nanotubos de carbono (CNTs)”***

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: JOSÉ LUIS GÓMEZ RODA

Tutor: GERMÁN CASTILLO LÓPEZ

Cotutor: FELIPE GARCÍA SÁNCHEZ

junio de 2.017



**Anexo G. Equipos utilizados**

**ÍNDICE ANEXO G. Equipos utilizados**

<b>1</b>	<b>AGITADOR MAGNÉTICO.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>AMASADORA AUTOMÁTICA.....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>BÁSCULAS.....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>MÁQUINA DE TRACCIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>5</b>	<b>PC 1: PORTÁTIL DELL .....</b>	<b>6</b>
<b>6</b>	<b>PC 2: SOBREMESA DELL .....</b>	<b>6</b>
<b>7</b>	<b>SONICADOR.....</b>	<b>7</b>
<b>8</b>	<b>UNIDAD DE MEDIDA.....</b>	<b>7</b>
8.1	CHASIS NI PXIE-1073 DE NATIONAL INSTRUMENTS .....	8
8.2	UNIDAD DE MEDIDA DE FUENTE DE NATIONAL INSTRUMENTS MODELO NI PXI-4130.....	9
8.3	MULTÍMETRO DIGITAL (DMM) PXI DE 7 ½ DÍGITOS Y DIGITALIZADOR DE 1000V DE NATIONAL INSTRUMENTS MODELO PXI-4071 .....	9



**Anexo G. Equipos utilizados**

## Anexo G. Equipos utilizados

### 1 Agitador magnético

El agitador magnético usado (Ilustración 1-1) es de la marca Nahita Blue, modelo 692/1. Este agitador magnético está equipado con un termopar. Las principales características técnicas se pueden consultar en la Tabla 1-1.

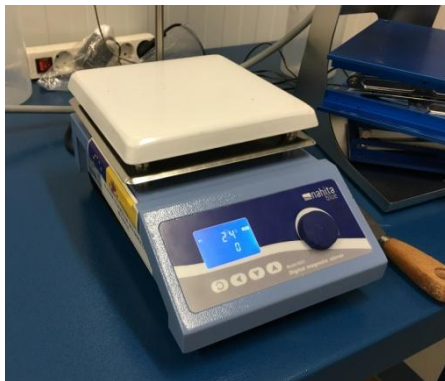


Ilustración 1-1 Agitador magnético Nahita Blue 692/1

Voltaje (V)	Velocidad (rpm)	Potencia de calefacción	Volumen Máximo	Temperatura máxima (placa)	Dim. Placa (mm)
220 V / 50 Hz	100-2000	600 W	1000 ml	350±10% °C	190x190

Tabla 1-1 Características técnicas agitador magnético

### 2 Amasadora automática

La amasadora automática programable usada es de la firma CONTROLS, modelo 65-L0512 (Ilustración 2-1). Las principales características técnicas son:

- Velocidad planetaria: 62-125 rpm
- Velocidad el batidor: 140 y 285 rpm o definida por el usuario
- Capacidad el bol: 5 litros
- Potencia: 370 W



Ilustración 2-1 Amasadora automática CONTROLS 65-L0512

## Anexo G. Equipos utilizados

### 3 Básculas

Se ha utilizado dos básculas distintas, la primera de ellas de la marca KERN PCB (Ilustración 3-1) con una capacidad máxima de 2000 g y división de escala de 0.1 g; y la segunda de la marca smartweigh (Ilustración 3-2) con una capacidad máxima de 5000 g y división de escala de 1 g.



Ilustración 3-1 Balanza KERN PCB



Ilustración 3-2 Balanza smartweigh

## Anexo G. Equipos utilizados

### 4 Máquina de tracción

La máquina de tracción disponible era de la casa Servosis, modelo ME-405/10 (). La información propia de esta unidad en concreto se puede consultar en la Tabla 4-1, mientras que las características técnicas están en la Tabla 4-2.

<b>Marca</b>	Servosis
<b>Modelo</b>	ME-405/10
<b>Nº de serie</b>	1801
<b>año de fabricación</b>	2007
<b>Calibración nº</b>	1318
<b>Fecha de calibración</b>	20/12/2017

Tabla 4-1 Identificación máquina de tracción

<b>Capacidad de carga (t)</b>	10
<b>Velocidad máx.de trabajo (mm/min)</b>	200. Opcionalmente hasta 500.
<b>Exactitud de la medida</b>	FUERZA: $\pm 1\%$ entre 1 y 100 % del nominal. Opcional $\pm 0.5\%$ POSICIÓN: $\pm 1\%$ entre 1 y 100 % del nominal. Opcional $\pm 0.5\%$
<b>Máx. luz axial libre (mm)</b>	1200
<b>Míb. luz axial libre (mm)</b>	0
<b>Requisitos eléctricos</b>	220/380 VAC / 50/60 Hz $\pm 10\%$

Tabla 4-2 Datos técnicos

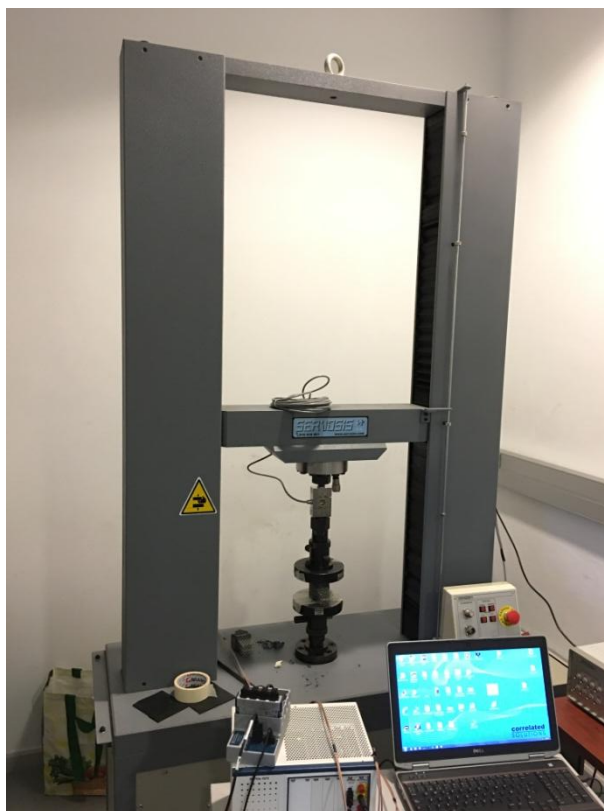


Tabla 4-3 Máquina de tracción Servosis ME-405/10

## **Anexo G. Equipos utilizados**

### **5 PC 1: Portátil DELL**

El ordenador que se ha usado para medir las resistencias eléctricas de los sensores con LabVIEW es un portátil de la marca DELL modelo Latitude E6520 (Ilustración 5-1), cuyas especificaciones principales son:

- S.O.: Windows 7 Professional Versión 2009 SP1
- Tipo de sistema: 64 bits
- CPU: Intel Core i5-2520 @ 2.50 GHz
- RAM: 4.00 GB

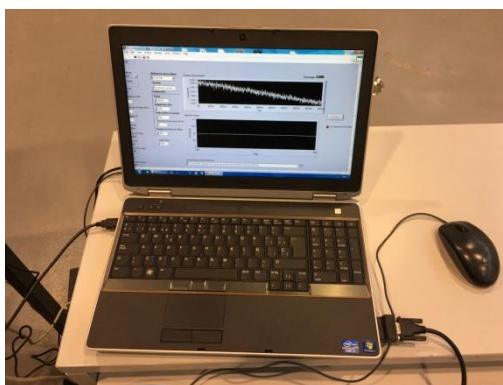


Ilustración 5-1 PC 1

### **6 PC 2: Sobremesa DELL**

El ordenador que controlaba la máquina de tracción a través del software específico para ello, PCD 2K, es un sobremesa de la marca DELL, modelo Dimension DM051 (Ilustración 6-1), cuyas especificaciones principales son:

- S.O.: Windows XP Home Edition Versión 2002 SP3
- Tipo de sistema: 32 bits
- CPU: Intel Pentium 4 @ 3.25 GHz
- RAM: 4.00 GB



Ilustración 6-1 PC 2

## Anexo G. Equipos utilizados

### 7 Sonicator

El sonicator empleado es un Hielscher UIP 1000 hdT (Ilustración 7-1), con una potencia máxima de 1000 W y una frecuencia de onda de 20 kHz. El sonotrodo seleccionado es el BS4d18, y no se ha empleado ningún booster.

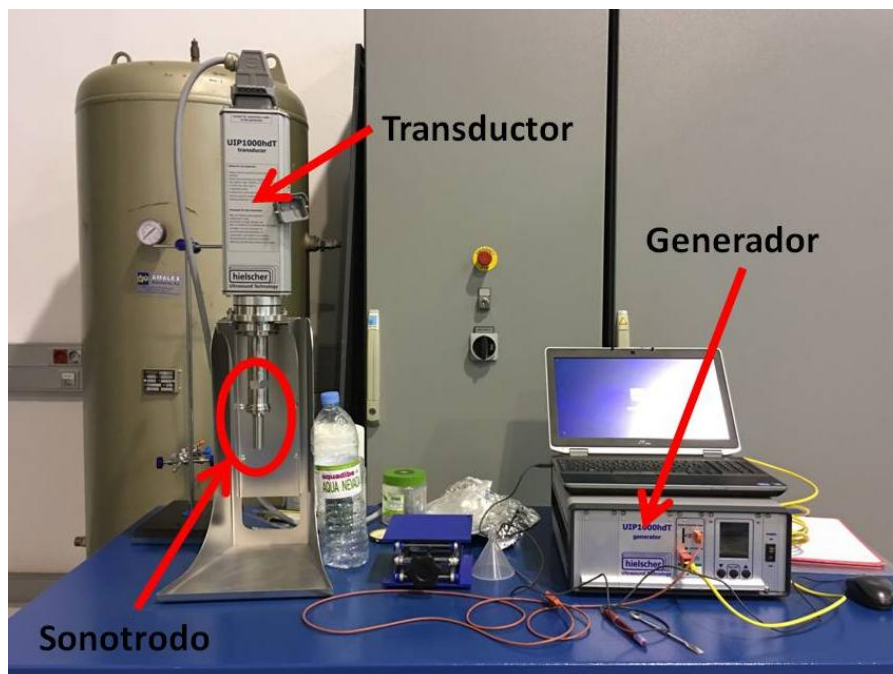


Ilustración 7-1 Sonicator Hielscher UIP 1000 hdT.

### 8 Unidad de medida

La Unidad de de Medida (Ilustración 8-1) está compuesta por:



Ilustración 8-1 Unidad de Medida

## Anexo G. Equipos utilizados

### 8.1 Chasis NI PXIe-1073 de National Instruments

La especificaciones técnicas son las correspondientes a la Tabla 8-1.

Genral	
Número de Ranuras	5
Tipo de Bus PXI	Compatible con PXI Híbrido PXI Express
Número de Ranuras Periféricas PXI Express	2
Número de Ranuras Periféricas Híbridas	3
Sistema Operativo / Objetivo	Cualquiera
Soporte para LabVIEW RT	Sí
Máximo Ancho de Banda del Sistema	250 MB/s
Acepta ambos Módulos PXI 3U y CompactPCI	Sí
Montaje en Rack Frontal o Posterior Opcional	Sí
Controlador Integrado	Sí
Requerimientos de potencia	
Potencia Total Disponible	150 W
Potencia Total Disponible	100 V – 240 V
Rango de Entrada de Frecuencia	47 Hz – 63 Hz
Fuente de Alimentación	Ca
Fuente de Alimentación Reemplazable en Campo	No
Control Remoto de Potencia Inhibida y Monitoreo de Voltaje	No

Tabla 8-1 Características chasis NI PXIe-1073

**Anexo G. Equipos utilizados**

**8.2 Unidad de medida de fuente de National Instruments modelo NI PXI-4130**

Las principales características son:

- Salida aislada de  $\pm 20\text{V}$ , 2 A
- Operación de 4 cuadrantes – absorción de hasta 10 W
- Detección remota (4 canales)
- 5 rangos de corriente – 2 A a 200  $\mu\text{A}$
- Resolución de medida de 1 nA en el rango de 200  $\mu\text{A}$
- Canal adicional para fuente programable y medida hasta 6 V, 1 A

**8.3 Multímetro digital (DMM) PXI de 7 ½ dígitos y digitalizador de 1000V de National Instruments modelo PXI-4071**

Las principales características son:

- Adquisición de forma de onda aislada de 1.8 MS/s, 1000 V
- Medidas de resistencia desde 10  $\mu\Omega$  a 5 G $\Omega$ .
- Aislamiento en modo común de  $\pm 500\text{ VDC/Vrms}$
- Medidas de voltaje desde  $\pm 10\text{ nV}$  a 1000 VDC (700 VAC)
- Rangos de corriente de 8 DC con sensibilidad debajo de 1 pA